



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

MĚŘICÍ DOTEKY VE STROJÍRENSKÉ METROLOGII

MEASURING PROBE TIPS IN ENGINEERING METROLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Böhm

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Jakub Böhm
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce:	doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Měřicí doteky ve strojírenské metrologii

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kvalita měřicích doteků v rozměrové kontrole součástek zásadním způsobem ovlivňuje úroveň měřicí techniky používané při hromadné výrobě automobilových součástí a dílů valivých ložisek. Prvním úkolem je návrh experimentálního zařízení pro funkční zkoušení měřicích doteků. Dalším úkolem je analýza vlivu druhu měřicích doteků na měřenou součást a rovněž analýza změn doteků při měření. Na základě experimentů budou formulována doporučení pro využívání klasických i experimentálních měřicích doteků. Řešení úkolu je zajištěno se spolupracující firmou.

Cíle diplomové práce:

1. Formulace požadavků na měřicí doteky v automobilovém a ložiskovém průmyslu.
2. Analýza vlastností používaných doteků.
3. Návrh experimentálního zařízení pro ověření vlastností měřicích doteků.
4. Analýza změn textury měřicích doteků a měřené součásti.
5. Doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

GARZINOVÁ, R. Prvky řídicích systémů. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2581-6.

WHITEHOUSE, D. J. Handbook of surface and nanometrology. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4200-8201-2.

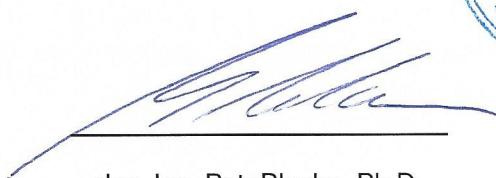
WHITEHOUSE, D. J. Surfaces and their Measurement. London: Kogan Page Ltd, 2004. ISBN 1-9039-9660-0.

VALÁŠEK, M. a kol. Mechatronika. Praha: ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01276-X.

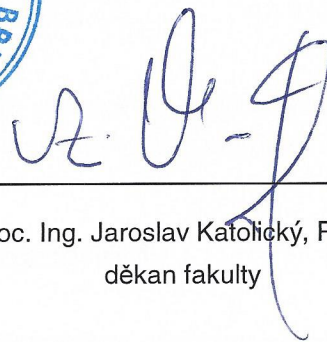
PERNIKÁŘ, J. a TYKAL, M.(2006): Strojírenská metrologie II. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-3338-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 26. 10. 2017



doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V této diplomové práci je řešena problematika měřicích doteků ve strojírenské metrologii. Práce pojednává o adhezivním a dalších druzích opotřebení, které způsobují měřicí doteky během dynamického měření. Je zde vyhodnoceno poškození měřené součásti ze siluminu i změny textury měřicích doteků vyrobených z karbidu titanu, nitridu křemíku, zirkonia, ložiskové oceli, rubínu, experimentálního kompozitu a nanokrystalického diamantu.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with measuring touches problems in industrial metrology. Thesis describes adhesive wear and tear which is caused by measuring probes when dynamical measuring is being concluded. Measuring of damaged component made of silumin and its different changes of texture by different measuring probes are evaluated. Measuring touches are made of titanium nitride, silicon nitride, zirconium, bearing chrome steel, ruby, experimental composite material and nanocrystalline diamond.

KLÍČOVÁ SLOVA

Adhezivní opotřebení, metrologie, měřicí doteky, dynamické metody měření, silumin, karbid titanu, nitrid křemíku, zirkonium, ložisková ocel, rubín, nanokrystalický diamant

KEYWORDS

Adhesive wear, metrology, measuring probes, dynamical measuring, silumin, titanium nitride, silicon nitride, zirconium, bearing chrome steel, ruby, nanocrystalline diamond

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BÖHM, J. *Měřicí doteky ve strojírenské metrologii*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 108 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat zejména panu doc. Ing. Róbertu Jankovýchovi, CSc. za cenné rady a neustálou pomoc během řešení této práce. Upřímně děkuji panu Ing. Janu Kůrovi z firmy MESING, s.r.o za všestrannou podporu při objasňování technologických procesů, které napomohly pochopení dané problematiky a rovněž za materiální zabezpečení při experimentech.

Dále děkuji panu doc. Ing. Vítu Janovi, PhD. z Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT v Brně za analýzu materiálu požitých součástí a dodanou literaturu. Panu kpt. doc. Ing. Zdeňku Pokornému, PhD. z katedry strojírenství Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany za konzultaci navrženého způsobu řešení dané problematiky a rovněž za dodanou literaturu. Pánům Ing. Václavu Duchoňovi a Ing. Janu Šrámkovi z oddělení délek Českého metrologického institutu za možnost využití jejich přístrojového vybavení.

V neposlední řadě děkuji panu Tomáši Böhmovi a zaměstnancům firmy MESING, s.r.o. za výrobu komponent použitých při stavbě experimentálních zařízení.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Róberta Jankovýcha, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne

.....

Böhm Jakub

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	MOTIVACE.....	15
3	TEORETICKÝ ROZBOR ÚLOHY	17
3.1	Požadavky na měřicí doteky	17
3.2	Popis poškození	17
3.2.1	Adhezivní poškození	18
4	NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ MĚŘICÍCH DOTEKŮ	21
4.1	Konstrukce experimentálního zařízení	21
4.2	Popis snímače	23
4.3	Hodnocení měřené délky	24
4.4	Měření tuhosti pružin.....	24
4.5	Vyhodnocovací jednotka indukčnostních snímačů imeco EDK 93.....	25
5	CHARAKTERISTIKA MATERIÁLŮ POUŽITÝCH V EXPERIMENTU	27
5.1	Materiál zkoumané součásti.....	27
5.1.1	Silumin.....	27
5.2	Materiály kuliček měřicích doteků	27
5.2.1	Karbid titanu	28
5.2.2	Nitrid křemíku	28
5.2.3	Zirkonium	28
5.2.4	Ložisková ocel	29
5.2.5	Rubín	29
5.2.6	Materiál TUL č.1	30
5.2.7	Nanokrystalický diamant	30
6	DEFINOVANÉ PODMÍNKY A METODIKA VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ	31
6.1	Podmínky experimentu	31
6.1.1	Měřená délka a rychlost měření.....	32
6.1.2	Přítlačná síla	32
6.2	Postup vyhodnocení opotřebení měřené součásti na CCI.....	34
6.3	Postup vyhodnocení opotřebení měřicího doteku na CCI	39
7	VÝSLEDKY EXPERIMENTU.....	41
7.1	Výsledky experimentu č.1	41
7.1.1	Karbid titanu	42
7.1.2	Nitrid křemíku	44
7.1.3	Zirkonium	46
7.1.4	Ložisková ocel	48
7.1.5	Rubín	50
7.1.6	Nanokrystalický diamant	52
7.2	Výsledky experimentu č.2	53
7.2.1	Karbid titanu	54
7.2.2	Nitrid křemíku	58
7.2.3	Zirkonium	61
7.2.4	Ložisková ocel	64

7.2.5	Rubín	67
7.2.6	TUL č.1	70
7.2.7	Diamant	73
7.2.8	Vyhodnocení experimentu s ISOPARAFINEM	75
7.3	Vyhodnocení experimentu č.3	78
7.3.1	Rubín	81
8	DOPORUČENÍ PRO PRAXI	83
8.1	Volba měřicího doteku na základě analýzy poškození měřené součásti	83
8.2	Volba měřicího doteku na základě analýzy jeho opotřebení	85
9	ZÁVĚR	87
10	BIBLIOGRAFIE	89
11	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	91
11.1	Seznam zkratk.....	91
11.2	Seznam tabulek.....	92
11.3	Seznam obrázků.....	93
12	SEZNAM PŘÍLOH.....	95

1 ÚVOD

Volba vhodného materiálu měřicího doteku může zásadním způsobem ovlivnit kvalitu povrchu měřené součásti. V předložené práci jsou formulovány požadavky na měřicí doteky používané v průmyslu. Je zde dále provedena analýza jejich vlastností. Na základě zjištěných poznatků bylo vyrobeno experimentální zařízení pro testování těchto doteků. Z vyhodnocených dat poškození povrchu měřené součásti jsou v této práci zformulována doporučení pro volbu a používání měřicích doteků v praxi. Jednotlivé kroky byly vyhodnoceny a konzultovány s firmou MESING s.r.o., která se zabývá vývojem a výrobou speciálních měřicích zařízení a měřicích automatů.

Práce je ve smyslu zadání a pokynů vedoucího rozčleněna do osmi kapitol a závěru.

Druhá kapitola obsahuje konkretizaci cílů této práce.

Ve třetí kapitole je pojednáno o současném stavu poznání řešené problematiky s důrazem na analýzu požadavků na měřicí doteky. V další části jsou zpracovány základní informace z dostupné literatury o mechanismu poškozování měřených součástí a měřicích doteků.

Ve čtvrté kapitole jsou popsány zařízení, které bylo nutné zkonstruovat pro provádění experimentů a měření parametrů jejich podmínek.

Pátá kapitola popisuje vlastnosti materiálů kuliček měřicích doteků a materiálu měřené součásti.

V šesté kapitole jsou objasněny podmínky prováděných experimentů a metodika vyhodnocení poškození na povrchu měřených součástí. Následující sedmá kapitola pojednává o jednotlivých experimentech a jsou v ní uvedeny výsledky měření a dílčí závěry experimentů.

Vyhodnocení všech experimentů ve formě doporučení pro praxi je uvedeno v osmé kapitole.

2 MOTIVACE

V řadě firem existují doposud nevyřešené problémy spojené s poškozením povrchu měřené součásti po její rozměrové kontrole. Avšak tyto problémy dosud nebyly v žádné dostupné literatuře dostatečně vyřešeny. Hlavní náplní této práce je proto provést experimenty s jasně definovanými podmínkami pro různé materiály kuliček měřicích doteků a na základě jejich vyhodnocení formulovat doporučení, jak se těmto problémům vyvarovat.

Tato práce rovněž volně navazuje na článek *Measurement-Induced Wear of Aluminum alloy Parts* [1], který vznikl na Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně ve spolupráci s firmou MESING s.r.o. v roce 2015. Drobným nedostatkem tohoto článku jsou nejasně definované podmínky experimentu a absence konkrétních doporučení pro praxi. V zahraniční literatuře je uvedená problematika řešena například v článcích [2] a [3], kde autoři sice jasně definují podmínky provedených experimentů, ale nepřináší žádné využitelné doporučení pro průmyslovou metrologii. Navíc je nutné zdůraznit, že uvedené články se zabývají pouze korundovými kuličkami měřicích doteků. Využití diamantových měřicích doteků je velmi dobře zpracované v knize *Multifunctional Materials for Tribological Applications* [4].

Uvedenou problematiku řeší z pohledu obecné tribologie nespočet veřejně dostupných prací, avšak dosud nebyla z nich žádná věnována jako celek měřicím dotekům v měřicích stanicích.

Na základě analýzy zadání diplomové práce, prostudování dostupné literatury a pokynů vedoucího byly stanovené cíle práce upřesněny takto:

1. Analyzovat a doplnit požadavky na měřicí doteky v automobilovém a ložiskovém průmyslu s důrazem na měření součásti vyrobených ze siluminu.
2. Analyzovat vlastnosti kuliček měřicích doteků z následujících materiálů:
 - karbid titanu (TiC),
 - nitrid křemíku (Si_3N_4),
 - zirkonium (ZrO_2),
 - ložisková ocel (ČSN 14 109),
 - rubín (Al_2O_3),
 - kompozitní materiál (dále jen TUL č.1),
 - nanokrystalický diamant.
3. Navrhnout a vyrobit experimentální zařízení pro měření přitlačné síly indukčnostních snímačů. Následně navrhnout a zhotovit laboratorní zařízení, které splňuje požadavky na měření v průmyslu a je na něm možné přesné nastavení přitlačné síly a rychlosti otáčení měřené součástky.
4. Vytvořit metodiku vyhodnocování poškození měřené součástky a měřicích doteků na přístroji Taylor Hobson TalySurf CCI Lite.
5. Formulovat v praxi využitelné doporučení k používání uvedených sedmi měřicích doteků a pokračování výzkumných úkolů v řešené problematice.

3 TEORETICKÝ ROZBOR ÚLOHY

Pro správné nastavení vyhodnocování měřené součásti a kuličky měřicího doteku je nutné analyzovat mechanismus poškození. Následující kapitola pojednává o mechanismu poškozování těchto konkrétních součástí.

3.1 Požadavky na měřicí doteky

V rozměrové kontrole součástí v průmyslu, zejména automobilovém a ložiskovém, se v posledním desetiletí začíná výrazněji upouštět od statistického vyhodnocování výsledků měření a opět se navrácí ke stoprocentní kontrole součástí. V tomto novém systému jsou kladeny čím dál vyšší nároky na snímače pro rozměrovou kontrolu součástí. Požadavky jsou zejména kladeny na velkou přesnost měření, vysoké rozlišení a opakovatelnost měření. Zároveň jsou kladeny vysoké požadavky na odolnost těchto snímačů, které se projevují v požadavcích na odolnost proti vibracím, kolísání teploty, vzdušné vlhkosti, prachu, olejovým mlhám atd.

Tato práce pojednává o poškození povrchu součástí těmito snímači při kontaktním měření výrobků v rámci jejich rozměrové kontroly přímo ve výrobě. V tomto procesu se většinou nepoužívá pouze jeden snímač, ale jde o soustavu snímačů, které jsou spojeny v komplexní měřicí zařízení. Ve výše uvedených odvětvích průmyslu se klade důraz na plně automatizované měření.

Požadavky pro taková zařízení jsou dále doplněny o požadavek na možnost přenosu výstupních dat měření a možnosti jejich dalšího zpracování například pro účely statistického řízení kvality. [5]

Všechny výše zmíněné požadavky vychází ze současných trendů v rozměrové kontrole součástí v automobilovém a ložiskovém průmyslu a dají se shrnout takto:

- minimalizace rizika „nezachycení“ neshodné součásti,
- 100% kontrola součástí,
- rychlost měření musí být shodná s taktem výrobní linky,
- při kontrole musí být změřena co největší část funkční plochy,
- měřicí zařízení musí dosahovat z hlediska přesnosti úrovně laboratorní techniky, [6],
- minimalizace rizika způsobení poškození měřené součásti,
- vysoká odolnost měřicích doteků proti opotřebení.

Tyto požadavky na měřicí zařízení se pohybují na hranici technické úrovně současné techniky. Problémy spojené s poškozováním povrchu měřené součásti se v budoucnu dají vyřešit použitím bezkontaktních metod měření. V současné době však tyto metody nedosahují v případě dynamických metod měření takové přesnosti jako kontaktní metody měření. Dále u nich často není splněn požadavek na rychlost měření a jsou náchylné na nečistoty, které se v průmyslu běžně vyskytují.

3.2 Popis poškození

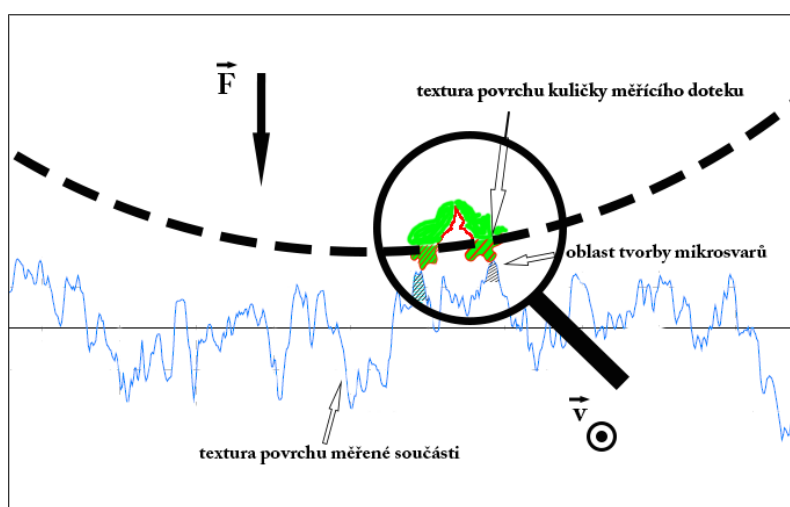
Princip měření spočívá v přitlačování kuličky měřicího doteku na povrch měřené součásti. Jelikož tvrdost materiálu kuličky měřicího doteku je větší než tvrdost materiálu měřené součásti, lze v ideálním případě u dynamických metod využívajících kontaktní měření očekávat adhezivní opotřebení. Opotřebení lze obecně definovat jako trvalou a nežádoucí změnu povrchu

materiálu součásti, způsobenou mechanickými účinky. Což se projevuje jako odstraňování nebo přemísťování částic z povrchu opotřebovávaného tělesa. [7]

Pro samotné vyhodnocení poškození měřené součásti je třeba vzít v úvahu, že součást není homogenní – v celém objemu může mít rozdílné chemické složení, různou tvrdost. Povrch součásti zároveň nemá v celé ploše stejnou texturu povrchu, lokálně se mohou vyskytovat škrábance, trhliny a může být pokryt oxidy nebo tenkými filmy kapalin z výrobního procesu. [8]

3.2.1 Adhezivní poškození

Adhezivní opotřebení je způsobeno relativním pohybem dvou těles (pohyb měřené součásti vůči měřicímu doteku), kdy dochází k oddělování materiálu vlivem působení meziatomových sil. Při tomto pohybu dochází ke kontaktu obou těles na velmi malé ploše. Jelikož povrch tělesa není hladký dochází ke kontaktu materiálů pouze v místě vrcholků textury povrchu, které se deformují. Mechanismus adhezivního opotřebení je zobrazen na obrázku 3.2.1.



Obrázek 3.2.1 Mechanismus adhezivního opotřebení

V tomto případě dochází ke kontaktu koule o průměru 3 mm a válce o průměru větším jak 80 mm. Přes to, že přítláčná síla je velmi malá, tak kontaktní tlak díky takto malé ploše bude dosahovat jednotek GPa. [2]

Samotný mechanismus opotřebení si lze představit propojení atomů obou těles, vlivem pohybu měřené součásti dojde k vytržení části materiálu těles. Čím dojde ke zvětšení stykové plochy, proto následně dochází k vytržení většího objemu materiálu. Takové opotřebení je dále charakteristické tvorbou mikro svarů a zalešťováním výstupků textury povrchu. [9]

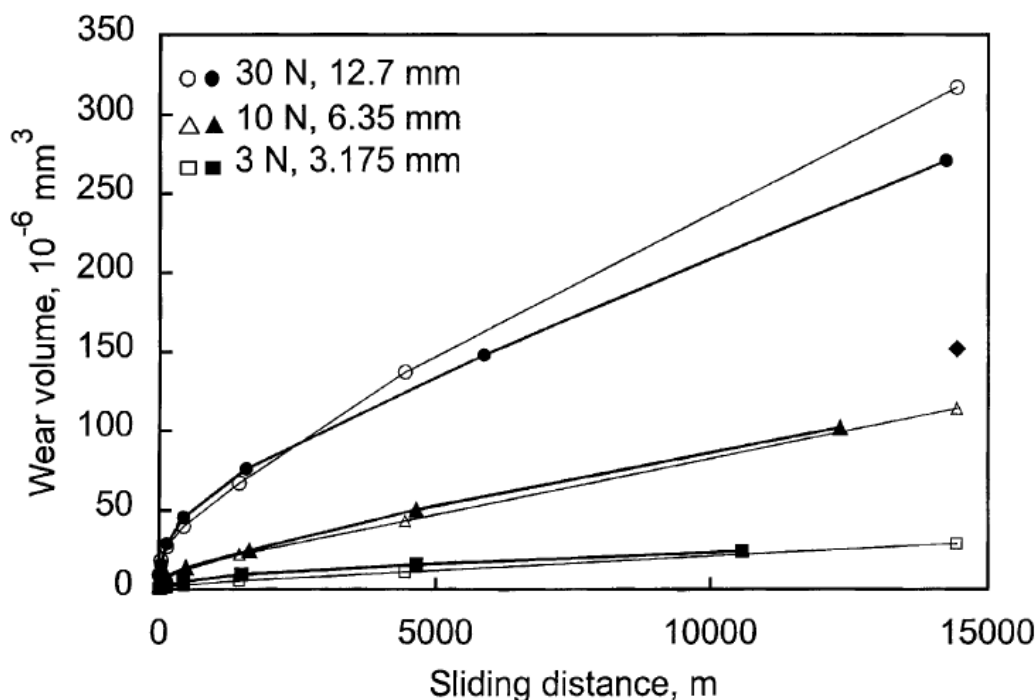
Teorie mechanismu opotřebení dle dostupné literatury nejsou stále jednotné. Při zkoumání se bude vycházet z předpokladu, že toto opotřebení je závislé na přítláčné síle, tvrdostí obou těles, měřené délce a textuře povrchu. Velikost opotřebení lze vyjádřit objemovým otěrem W_0 :

$$W_0 = K_{adh} \frac{F^\alpha L}{3p_m} [mm^3/m] \quad (1)$$

kde F je přítláčná síla [N], L měřená délka [m], p_m kontaktní tlak [Pa] který odpovídá tvrdosti měkkého materiálu, α exponent volený z intervalu 0,6 až 1,0 [-] a K_{adh} součinitel adhezivního opotřebení, který popisuje kluznou dvojici. [7]

Na základě tohoto vztahu se předpokládá, že výsledné opotřebení měřené součásti bude závislé na přítláčné síle, měřené délce, rychlosti otáčení a materiálu kuličky měřicího doteku. K tomuto závěru se došlo mimo jiné i na základě odborných článků Effect of Contact Pressure and Load on Wear of Alumina a Study of sapphire probe tip wear when scanning on different materials.

Na základě uvedeného článků [2] se očekává úroveň poškození pro rubínovou kuličku měřicího doteku dle následujícího grafu (obr. 3.2.2). V tomto grafu je znázorněna závislost míry poškození součásti na měřené délce.



Obrázek 3.2.2 Očekávané poškození povrchu měřené součásti [2]

Dále se předpokládá, že vliv na celkové opotřebení měřené součásti má i předchozí ošetření povrchu vzorku. Jelikož proces výroby a kontroly v průmyslu není totožný a je závislý na typu výroby. Stejně tak jsou v průmyslu různé metody čištění výrobků a používají se i různé čisticí a konzervační prostředky. Dle zjištění se v některých firmách výrobky před samotnou kontrolou nečistí, tudíž se předpokládá, že na povrchu vzorku mohou tedy zůstat nedefinované filmy kapalin používané v procesu výroby. Může se jednat o zbytky řezných/chladících nebo brousících emulzí. Všechny tyto vlivy pak ovlivňují součinitel adhezivního opotřebení K_{adh} ze vztahu (1), který je uveden výše.

Avšak v případě měření součástí z hliníkových slitin se nedá očekávat lineární průběh tvorby opotřebení. [3]

V dostupné literatuře nejsou dosud dostatečně popsány jevy způsobující poškození měřicích součástí a také není popsáno poškození součásti způsobené jinými materiály kuliček měřicích doteků kromě korundových materiálů.

4 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ MĚŘICÍCH DOTEKŮ

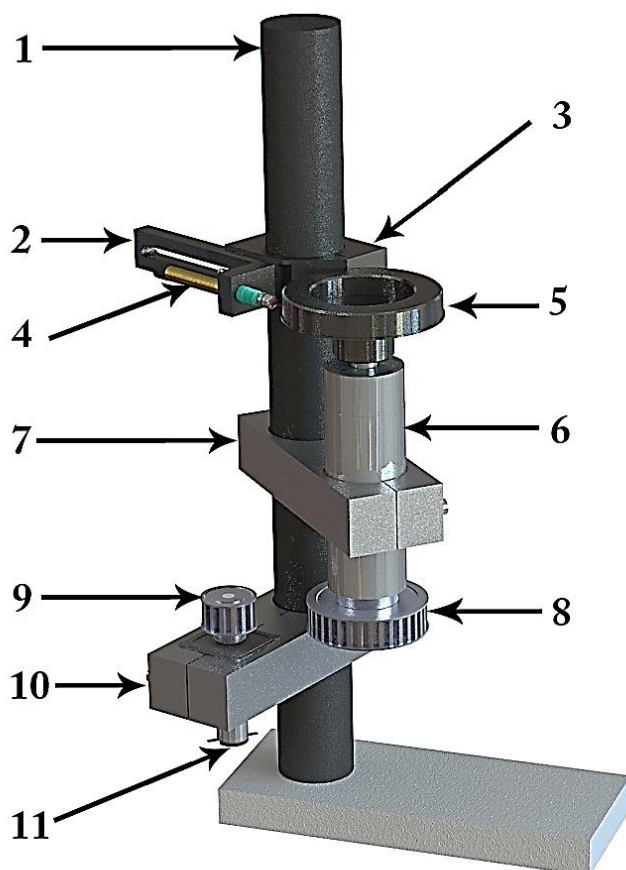
Pro vytvoření definovaného poškození měřené součásti a kuličky měřicího doteku za definovaných podmínek bylo nejprve nutné zkonstruovat zařízení, na kterém by toto poškození bylo zrealizováno. Dále bylo nutné analyzovat přítlakovou sílu v použitém snímači, pro možnost přesného nastavení přítlakové síly během experimentů.

Následující kapitola se věnuje konstrukci experimentálního zařízení, dále pak konstrukci použitého snímače, zvolením způsobu snímání měřené délky a přítlakové síly.

4.1 Konstrukce experimentálního zařízení

Konstrukce tohoto zařízení respektuje požadavky na měřicí zařízení firmy MESING. Požadavky na měřicí zařízení uvedené v kapitole 2 byly rozšířeny o požadavky na minimalizaci osového házení, zajištění plynulého chodu otáček, zajištění požadované rychlosti otáčení, nastavení přítlakové síly a sledování měřené délky.

Model tohoto zařízení je zobrazen na obrázku 4.1.1.



Legenda

1 – stojan, 2 – držák měřicího doteku,
 3 – vedení pro držák měřicího doteku,
 4 – měřicí dotek, 5 – upínák měřené
 součásti, 6 – hřídel, 7 – držák hřídele,
 8 – řemenice hřídele, 9 – řemenice
 motoru, 10 – držák motoru, 11 – motor

Obrázek 4.1.1 Model experimentálního zařízení

Základem tohoto zařízení je stojan (1), který zajišťuje stabilitu celého zařízení. Tento stojan byl vyroben z kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny, díky čemu je zajištěna minimální délková roztažnost.

Na tento stojan bylo upevněno vedení držáku měřicího doteku (3), na který byl upevněn samotný držák (2), díky čemu bylo možné nastavit požadovanou vzdálenost snímače od měřené součásti a tím nastavovat i požadovanou přitlačnou sílu. Na tento držák byl upevněn již samotný snímač (4).

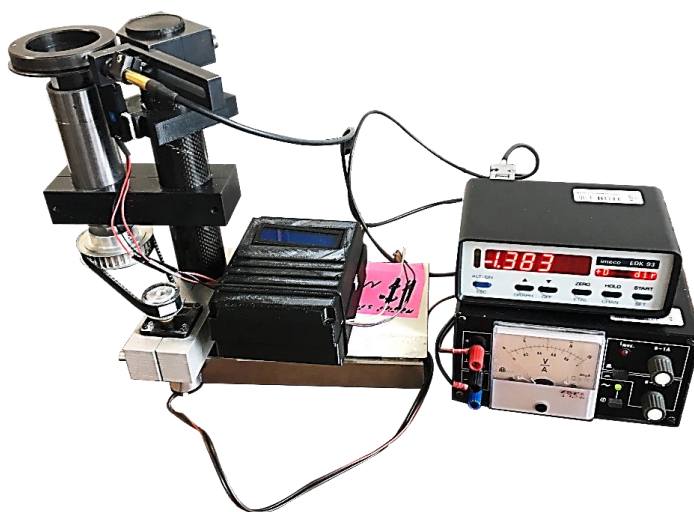
Dále bylo nutné vyřešit uložení hřídele, na které by rotovala měřená součást. Hřídel (6) byla získána od firmy MESING. Tato hřídel využívá kuželového uložení, a právě tento typ uložení zaručuje minimální osově házení, model této hřídele se nachází v obrázku 4.1.2. K připevnění na stojan byl využit držák (7). K této hřídeli byl následně upevněn upínák měřené součásti (5) a řemenice (8).



Obrázek 4.1.2 Model použité hřídele

Využitím dalšího držáku (10) byl ke stojanu (1) upnut elektromotor Maxwell (11). Tento motor slouží k zajištění plynulého otáčení. V průmyslových aplikacích je rychlost otáčení často volena $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Při tomto zapojení nebylo možné požadované rychlosti dosáhnout tudíž byla k motoru připevněna další řemenice (9), tak aby výsledný převodový poměr byl 1:2. Kroutící moment mezi řemenicemi byl přenášen zubovým řemenem, který na obr. 4.1.1 není znázorněn.

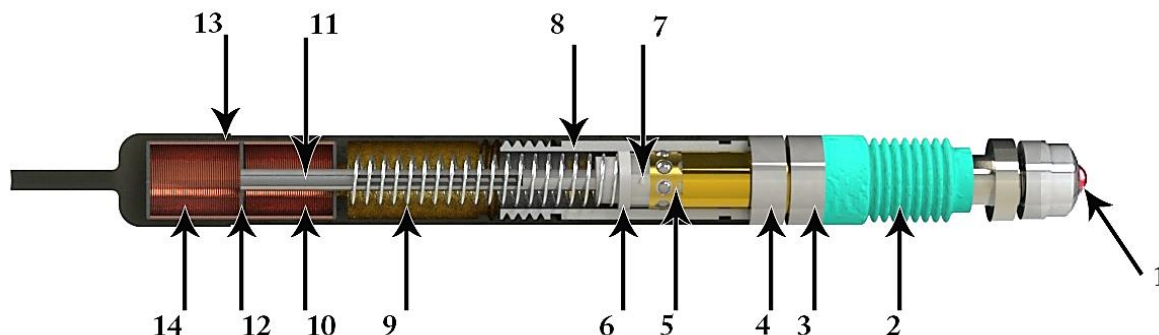
Výsledná sestava na obr. 4.1.3 byla oproti modelu (obr. 4.1.1) doplněna o vyhodnocovací jednotku indukčnostních snímačů imeco EDK 93 (dále jen EDK), do kterého je zapojen snímač a ze kterého je možné odčítat rozměrové odchylky. Dále je doplněna o zdroj napětí s možností regulace napětí díky lze měnit rychlost otáček, který byl propůjčen odborem elektroniky a elektrotechniky při Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky. Poslední změnou oproti modelu se stalo doplnění snímače, vlastní konstrukce, pro snímání měřené délky. [10]



Obrázek 4.1.3 Experimentální zařízení

4.2 Popis snímače

Při experimentech byl využit polomostový indukčnostní snímač série T200, který ve svých aplikacích využívá firma MESING. V tomto případě se jedná o snímač s kuličkovým vedením vyráběný firmou Peter Hirt GmbH. Konstrukce snímače je zobrazena v obr. 4.2.1. [11]



Legenda

1 – kulička měřicího doteku, 2 – wuitonová manžeta, 3 – matka pro připevnění krycí manžety, 4 – matka pro aretaci výchozího nastavení snímače, 5 – kuličkové vedení, 6 – chránič dorazu, 7 – doraz, 8 – tělo snímače, 9 – pružina, 10 – snímací cívka, 11 – feromagnetické jádro, 12 – magnetické stínění, 13 – stínící jádro, 14 – snímací cívka

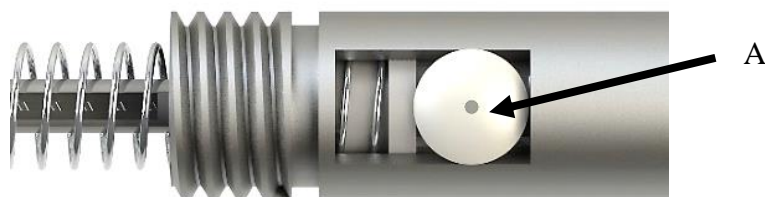
Obrázek 4.2.1 Polomostový indukčnostní snímač s kuličkovým vedením

Funkce tohoto snímače je založena na přitlačování kuličky měřicího doteku na povrch měřené součásti, která je v pohybu v relativním pohybu vůči snímači. Tato přitlačná síla je vyvíjena tlačnou pružinou (9). Velikost přitlačné síly se dá ovlivnit výměnou pružiny za jinou. Do jisté míry se dá velikost přitlačné síly měnit šroubováním těla snímače (8) do krytu snímače a následným zaaretováním této polohy mocí matice (4). Velikost přitlačné síly dále ovlivňuje krycí manžeta (2).

Hřídel, která prochází celým tělem snímače má na jednom konci upevněnu kuličku měřicího doteku (1) a na druhém feromagnetické jádro (11), které se pohybuje ve snímacích cívkách (10,14). V těchto cívkách se indukuje elektrické napětí, které je možné EDK přepočítat na posuv, který je možno odečítat z tohoto počítače.

Jelikož tento snímač má zdvih 3 mm, tak je nutné v nezátíženém stavu jej seřídít na hodnotu -1,5 mm, právě kvůli nastavení spodní hranice snímání a tím pádem symetrického nastavení zdvihu kolem nulové polohy snímače. Toho dosáhneme výše popsanou úpravou polohy těla snímače.

Radiální vůle v tomto snímači je minimalizována kuličkovým vedením (5). Toto vedení je „bezvůlové“, je vyrobeno s přesahem 0,5 μm . K zamezení protáčení hřídele snímače je využita kladka (A) zobrazena na obr. 4.2.2, u které se využívá kuželového uložení.



Obrázek 4.2.2 Kladka měřicího doteku

4.3 Hodnocení měřené délky

Pro snímání rychlosti otáčení vzorku byl využit laserový otáčkoměr Voltcraft DT-30LK, dále jen LO. Pro účely samotného experimentu bylo nutné snímat počet otáček, ze kterého by bylo možné vypočítat měřenou délku. [12]

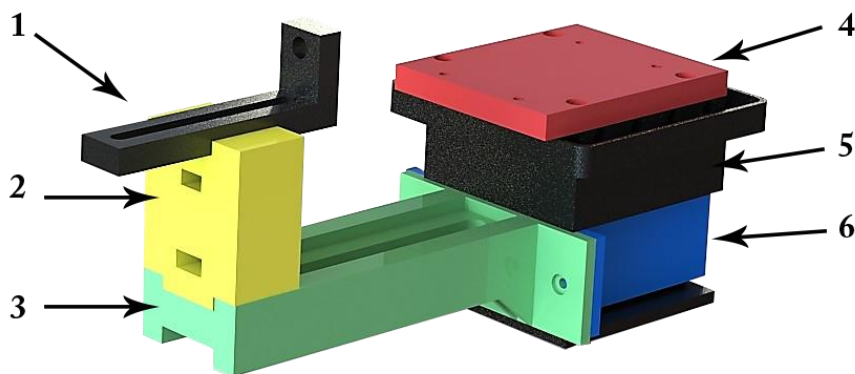
LO disponoval funkcí počítání otáček, avšak využití této funkce pro účely experimentů nebylo vhodné, jelikož po celou dobu experimentu by bylo nutné držet stisknuté tlačítko pro zapnutí otáčkoměru. Proto pro tyto účely byl zkonstruován vlastní snímač počtu otáček postavený na platformě Arduino UNO, využívající jazýčkový magnetický snímač. Toto zařízení bylo dále osazeno prvkem DHT 22 pro kontinuální teploty a relativní vlhkosti v laboratoři. K zobrazení získaných hodnot pro počet otáček a celkové uražené vzdálenosti byl využit LCD display, hodnoty teploty a vlhkosti v místnosti byly zasílány po sériové lince do počítače, kterým bylo toto zařízení i napájeno. [13]

Zařízení detekovalo pouze celé otáčky a vypínání experimentálního zařízení (kap. 3.1) bylo prováděno manuálně, tudíž nebylo možné dosáhnout měřené délky přesně 100,00 m. Program pro tento snímač je uveden v příloze A.

4.4 Měření tuhosti pružin

Dále bylo nutné zkonstruovat zařízení, na kterém by bylo možné změřit přítlačnou sílu, kterou působí měřicí dotek na měřenou součást.

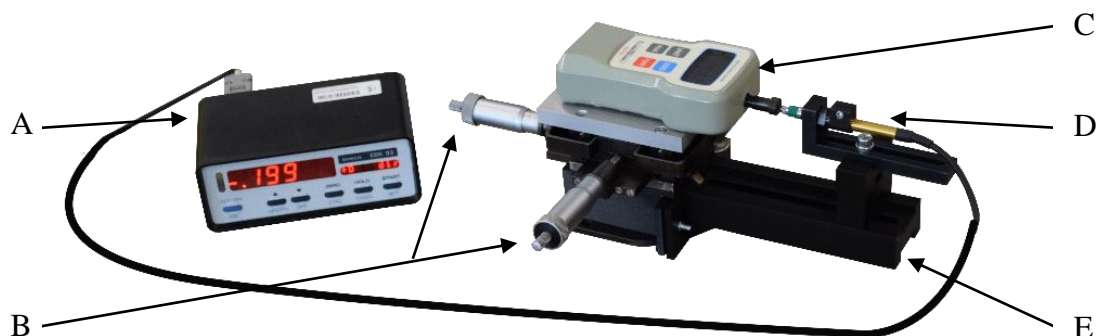
K měření samotné přítlačné síly byl použit siloměr SHITO STO-1 s rozsahem 10 N. K uvedenému siloměru bylo nutné zkonstruovat takový držák, aby bylo možné změřit průběh sil v celém zdvihu snímače. Model celé soustavy je zobrazen na obr. 4.4.1. Postup měření je popsán v kapitole 5.1.2. [14]



1 – držák měřicího doteku, 2 – výškový nástavec, 3 – vedení pro nastavení vzdálenosti výškového nástavce, 4 – deska pro uchycení siloměru, 5 – model suportu, 6 – objímka pro upevnění soustavy k suportu

Obrázek 4.4.1 Model zařízení pro měření přítlačné síly

Jako základ tohoto zařízení byl použit model suportu (5), kterým bylo možné pohybovat siloměrem ve dvou navzájem kolmých směrech pomocí dvou mikroposuvů (B). Na tento suport byl prostřednictvím desky (4) nainstalován výše zmíněný siloměr (C). Uchycení držáku měřicího doteku (1) k této soustavě bylo zrealizováno pomocí objímky (6), vedení (3) a výškového nástavce (2). Všechny tyto komponenty byly vyrobeny 3D tiskárnou ANYCUBIC i3 z PLA plastu.



Legenda

A – EDK, B – mikroposuvy, C – siloměr, D – měřicí dotek, E – přípravek pro měření tuhosti pružin

Obrázek 0.1 Zařízení pro měření přítláčné síly

4.5 Vyhodnocovací jednotka indukčnostních snímačů imeco EDK 93

Vyhodnocovací jednotka imeco EDK 93 (obr. 4.4.2; pozice A) je určena pro statická i dynamická měření a dokáže pracovat až se 4 zapojenými snímači.

Jelikož frekvenční převodník je umístěn do konektoru snímače, tak tato vyhodnocovací jednotka funguje pouze jako počítač. Díky této konstrukci, kdy koeficienty linearizace snímače jsou uloženy v jeho konektoru, jsou jednotlivé snímače zaměnitelné bez omezení. [15]

5 CHARAKTERISTIKA MATERIÁLŮ POUŽITÝCH V EXPERIMENTU

5.1 Materiál zkoumané součásti

Pro provedené experimenty byly, na základě požadavků firmy MESING, použity dvě součásti, pro které má být vyhodnocena vhodnost materiálu měřicích doteků. Součásti, které jsou dále označené jako AL1 a AL2 byly vyrobeny z materiálu zvaného silumin.

5.1.1 Silumin

Zkoumané součásti AL1 a AL2 byly vyrobeny, dle dodaných informací, z hliníkové slitiny obsahující 9% křemíku.

Obě dvě součásti jsou totožné, byly vyrobeny jako příruby pro automobilový průmysl. Tento materiál je vůbec v automobilovém průmyslu velmi častý z důvodu nízké hmotnosti a možnosti odlévat tenkostěnné součásti. [16]

Na základě zkoumání bylo zjištěno, že této informaci nejvíce vyhovuje materiál EN AB-46000, Jehož konkrétní chemické složení odpovídá tabulce 5.1.1

Tabulka 5.1.1 Chemické složení materiálu EN AB 46000 [17]

Cu	Fe	Zn	Al	Ni	Si	Mg	ostatní
2,0 – 4,0 %	0,6 – 1,1 %	1,20%	Zbytek	0,55%	8,0-11,0%	0,15- 0,55%	1,65%

Pevnost v tahu tohoto materiálu je $R_m=240\text{MPa}$ a tvrdost podle Brinella je 80MPa.

Tyto součásti byly následně podrobeny spektrální analýze elektronového mikroskopu na Ústavu materiálových věd a inženýrství. Na základě této analýzy bylo zjištěno, že materiál součásti AL2 je špatně vyroben, jelikož obsahuje řadu dutin a vměstků dalších materiálu, které by obsahovat neměl.

5.2 Materiály kuliček měřicích doteků

Pro experimenty bylo zvoleno 7 základních materiálů, z nichž byly vyrobeny jednotlivé kuličky měřicích doteků. Těmito materiály jsou: ložisková ocel 14109, karbid titanu, nitrid křemíku, zirkonium, rubín, nanokrystalický diamant a kompozitní materiál TUL č.1.

Výroba těchto kuliček měřicích doteků z hlediska přesnosti podléhá stejné normě jako výroba kuliček do ložisek. Norma ISO 3290 popisuje třídy přesnosti kuliček, na základě této informace se poté volí kuličky měřicích doteků.

5.2.1 Karbid titanu

Karbid titanu je slinutý karbid, s chemickým označením TiC. Kuličky z tohoto materiálu použity v našich experimentech jsou dodávány firmou REDHILL PRECISION SPECIALTY BALLS (dále jen REDHILL).

Dle dostupných údajů je kulička z tohoto materiálu charakterizována těmito vlastnostmi:

Tabulka 5.2.1 Vlastnosti kuličky karbidu titanu [18]

Přesnost	Tvrdost	Měrná hmotnost
ISO 3290 G10	Mosh 9-9,5 ¹	4,93g/cm ³

5.2.2 Nitrid křemíku

Nitrid křemíku je keramický materiál, jehož chemické označení je Si₃N₄. Kuličky z tohoto materiálu použity v našich experimentech jsou také dodány firmou REDHILL. Materiál dosahující vysoké tvrdosti a také velké odolnosti proti opotřebení.

Dle dostupných údajů je kulička z tohoto materiálu charakterizována těmito vlastnostmi:

Tabulka 5.2.2 Vlastnosti kuliček nitridu křemíku [18]

Přesnost	Tvrdost	Teplotní odolnost	Měrná hmotnost
ISO 3290 G10	1240 HV10 ²	Do 1300 °C	3,21g/cm ³

Tento materiál by měl být vhodný pro měření součástí z hliníkových slitin, jelikož údajně nedochází k vzájemnému působení. [18]

Technické parametry dle katalogu Renishaw:

- tvrdost 1 600 HV,
- pevnost v tlaku 3 000 MPa,
- pevnost v ohybu 850 MPa. [20]

5.2.3 Zirkonium

Zirkonium je druh keramiky, jehož chemické označení je ZrO₂. Kuličky z tohoto materiálu použity v našich experimentech jsou opět dodány firmou REDHILL. Tento materiál má obdobné vlastnosti jako rubín, na rozdíl od něj je vhodný pro měření součástí z litiny. [19]

¹ Moshova stupnice tvrdosti

² Zkouška tvrdosti podle Vickerse, při zatížení 10kp

Dle dostupných údajů je kulička z tohoto materiálu charakterizována těmito vlastnostmi:

Tabulka 5.2.3 Vlastnosti kuliček zirkonia [18]

Přesnost	Tvrdost	Teplotní odolnost	Měrná hmotnost
ISO 3290 G10	1240 HV10	Do 2400 °C	6,0g/cm ³

Technické parametry dle katalogu Renishaw:

- tvrdost 1 200 HV,
- pevnost v tlaku 2 000 MPa,
- pevnost v ohybu 1 000 MPa. [19]

5.2.4 Ložisková ocel

Jedná se chromovou ocel pro výrobu valivých ložisek, označenou ČSN 14 109. Tato ocel je vhodná pro součásti, u kterých se vyžaduje vysoká tvrdost jejich povrchu. Kuličky z tohoto materiálu použité v našich experimentech jsou opět dodány firmou REDHIL. Vedle rubínu se jedná o nejpoužívanější materiál měřicích doteků.

Dle dostupných údajů je kulička z tohoto materiálu charakterizována těmito vlastnostmi:

Tabulka 5.2.4 Vlastnosti kuliček ložiskové oceli 14 109 [18]

Přesnost	Tvrdost	Mez kluzu	Měrná hmotnost
ISO 3290 G10	60-66 HRC ³	207 kgs/mm ²	7,833g/cm ³

5.2.5 Rubín

Rubín je druhem korundu (Al₂O₃), jedná se o červeně zbarvený drahokam. Kuličky z tohoto materiálu použité v našich experimentech jsou opět vyrobeny firmou REDHILL. Tyto kuličky vynikají především výjimečně hladkým povrchem.

Předpokládá se, že při využití tohoto materiálu je opotřebení závislé na jiných proměnných pro různé materiály měřených součástí. Například pro měření kalené oceli se předpokládá, že objem poškození součásti není závislý na přitlačné síle. [3]

Tento materiál je nevhodný pro měření součástí ze slitin hliníku, jelikož oba dva materiály se přitahují. Tento jev by měl na povrchu měřicího doteku způsobovat nánosy přetvořeného materiálu hliníkové slitiny, nazývaný jako adhezivní otěr. [19]

Dle dostupných údajů firmy Redhill je kulička z tohoto materiálu charakterizována těmito vlastnostmi:

Tabulka 5.2.5 Vlastnosti kuliček rubínu [18]

Přesnost	Tvrdost	Měrná hmotnost
ISO 3290 G10	1800 HV10	3,990g/cm ³

Z katalogu Renishaw je tento materiál popsán těmito parametry:

- tvrdost 2 300 HV,
- pevnost v tlaku 2100 MPa,
- pevnost v ohybu 400-700 MPa. [20]

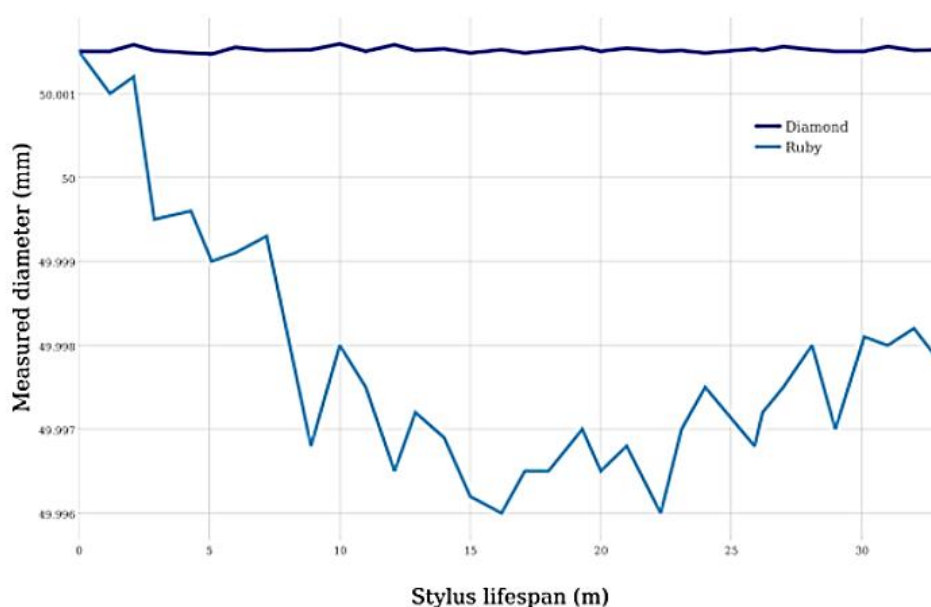
³ Zkouška tvrdosti podle Rockwella, při zatížení 98N

5.2.6 Materiál TUL č.1

Jedná se o kompozitní materiál dvousložkového lepidla a rostlinného materiálu. Dále bude používáno označení TUL č.1. Kuličky z tohoto materiálu použité v experimentech jsou vyrobeny a vyvíjeny Technickou univerzitou v Liberci ve spolupráci s firmou MESING. Do termínu odevzdání této práce nebyly parametry tohoto materiálu zveřejněny.

5.2.7 Nanokrystalický diamant

Jedná se o keramickou kuličku, na které je nanesena vrstva 20 μ m nanokrystalického diamantu. Takový materiál kuličky měřicího materiálu je extrémně tvrdý. Zaručuje minimální opotřebení měřicího doteku a také minimální opotřebení měřené součásti. V následujícím obrázku 5.2.1 je znázorněno porovnání nanokrystalického diamantu s rubínem v závislosti opotřebení kuličky měřicího doteku na měřené délce [21]



Obrázek 5.2.1 Závislost opotřebení kuliček měřicího doteku z rubínu a nanokrystalického diamantu v závislosti na měřené délce [21]

6 DEFINOVANÉ PODMÍNKY A METODIKA VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ

Tato kapitola se zabývá stanovením požadavků na předchozí ošetření měřené součásti, definováním požadavku na měřenou délku a přítlačnou sílu. Následně zde byly stanoveny parametry vyhodnocení prohlubní a s tím jsou popsány postupy vyhodnocení poškození měřené součásti a kuličky měřicího doteku.

6.1 Podmínky experimentu

Při stanovování podmínek se vychází z článku, který vznikl na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky ve spolupráci s firmou MESING. Jasně stanovené podmínky mají odstranit nejednoznačná místa experimentu popsaného v tomto článku. [1]

Při stanovení podmínek experimentu se vycházelo z předpokladu, že výsledné opotřebení bude závislé, kromě materiálu součásti a kuličky, na měřené délce, přítlačné síle snímače, rychlosti otáčení vzorku a rovněž čistotě povrchu měřené součásti.

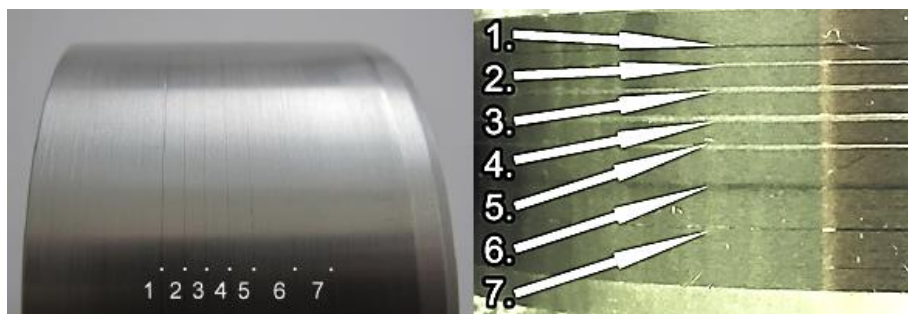
Při pokusu zopakovat stejný experiment jako je popsán v článku, se došlo k závěru, že přes stejné podmínky byly získány různé výsledky. Tyto výsledky jsou popsány v následující tabulce tab. 6.1.1. Fotografie poškození jsou obsaženy v následujícím obrázku 6.1.1, kde vlevo se nachází snímek poškození povrchu součásti z článku a vpravo se nachází fotografie opakovaného provedení experimentu. Kompletní výsledky tohoto opakovaného experimentu jsou uvedeny v příloze B.

Tabulka 6.1.1 Opakování a porovnání experimentu z článku [1]

	Z_t [μm]	Z_{max} [μm]
Rubín	2,43	36,281
Nitrid křemíku	2,81	32,992
Zirkonium	3,12	32,034
Tvrdokov	2,56	13,245
Nanokrystalický diamant	2,7	-

- poškození nenaměřeno

Oba dva parametry Z_t a Z_{max} značí maximální hloubku prohlubně, avšak metodika vyhodnocení obou těchto parametrů prohlubně není stejná, přesto jsou tyto parametry ekvivalentní. Metodika vyhodnocení parametru Z_{max} je popsána v kapitole 6.2.



Obrázek 6.1.1 Porovnání výsledků experimentu [1]

Na základě těchto výsledků se došlo k závěru, že u experimentu provedeného v tomto článku nebyla pravděpodobně dodržena definovaná měřená délka a ani přítlačná síla. Dále kvůli výsledkům z opakovaného experimentu, kdy se opět nepodařilo dosáhnout stejných výsledků, bylo navrženo před provedením experimentu ošetřit povrch měřené součásti. Jelikož je zřejmé, že na této součásti se mohou vyskytovat zbytky chladících, řezných, brusných nebo konzervačních přípravků. Je velmi pravděpodobné, že tyto výsledky ovlivnila i mastnota přenesená na povrch měřené součásti z rukou.

Analýzou dostupných údajů z automobilového průmyslu bylo zjištěno, že v průmyslu se běžně povrchy součástí před měřením čistí a konzervují, ale dochází i k tomu že vyrobená součást se měří bez žádného předchozí úpravy povrchu součásti. Což dle tohoto závěru ovlivňuje výsledné poškození součásti.

6.1.1 Měřená délka a rychlost měření

Při stanovení požadavku na měřenou délku se vyšlo z dostupných informací, že takt měřicího automatu je přibližně 10 sekund, tudíž na samotné měření zbývají přibližně tři vteřiny, během kterých měřená součást musí vykonat alespoň jednu otáčku. Z těchto dat se dá snadno vypočítat, že za 8 mi hodinovou směnu při měření součásti o průměru 87 mm. Automat dokáže změřit zhruba 3 000 součástí, kdy měřená délka může činit více jak 800 m.

Měřená délka pro experimenty byla stanovena na 100 m kvůli možnosti vyhodnocení opotřebení na měřicích dotecích. Zároveň tato délka je dostatečně velká, aby ji bylo možné porovnat s měřenou délkou, kterou měří snímač v měřicím automatu za jednu směnu. Díky tomu je možné formulovat doporučení časového intervalu na výměnu měřicího doteku. Opotřebení na měřené součásti samozřejmě bude mnohonásobně převyšovat míru poškození součásti v automatu během měření, avšak díky této velké měřené délce je možné lépe posoudit vhodnost jednotlivých materiálů měřicích doteků pro daný materiál měřené součásti.

Z důvodu snímání počtu otáček pomocí magnetického snímače, který detekoval celé otáčky, byla měřená délka pro všechny vzorky do 100,253 metru.

Rychlost otáčení vzorku experimentu byla stanovena na $0,5 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1} \cong 30 \text{ RPM}$. Právě proto, aby rychlost otáčení přibližně odpovídala rychlosti otáčení vzorku v měřicím automatu.

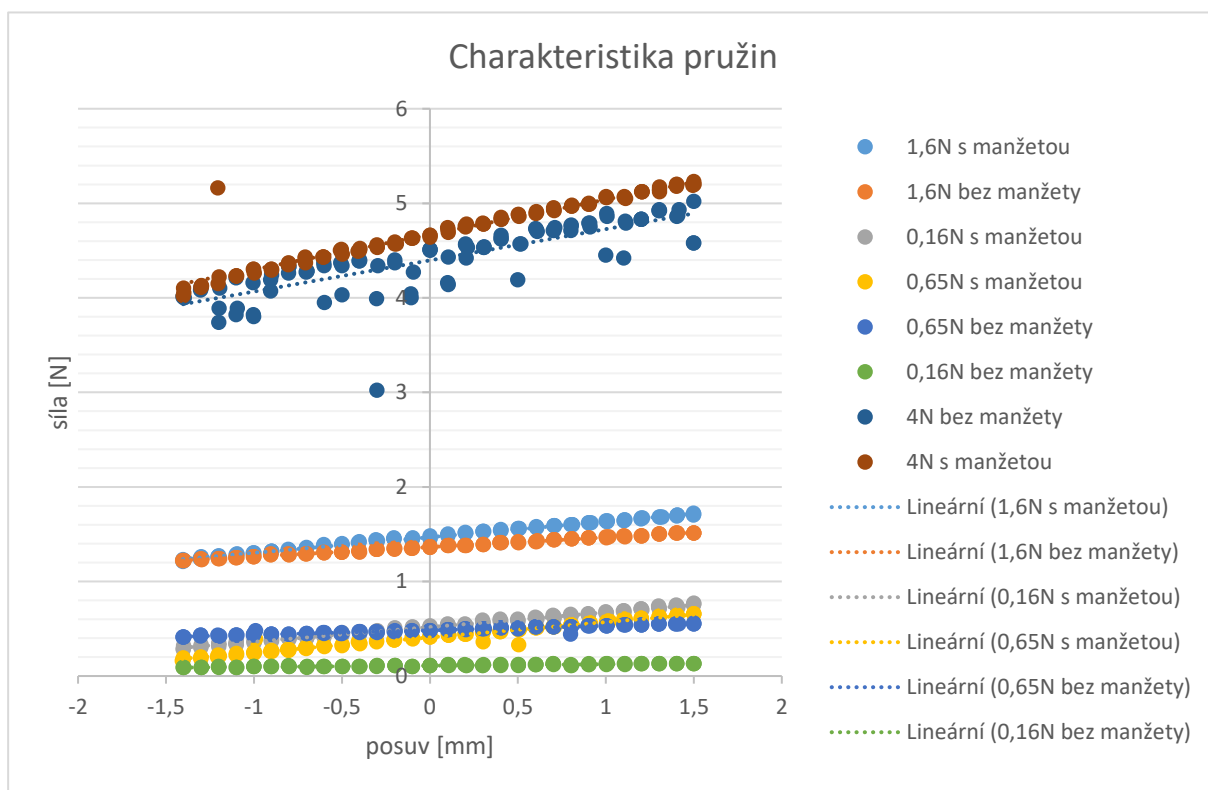
6.1.2 Přítlačná síla

Pro zkoumání přítlačné síly byly použity standardně dodávané pružiny 0,16N, 0,65N, 1,6N a 4N. Ve výchozím nezatíženém stavu byl dotek seřízen na hodnotu -1,5 mm (hodnota odečítána EDK), postup nastavení snímače je popsán v kapitole 4.2. Snímač byl připevněn na stojan, na který byl rovněž nainstalován siloměr (obr. 4.4.2). Pomocí mikro posuvu byl posouván siloměr souběžně s osou doteku, kdy hodnoty byly odečítány z EDK a ve zvolených místech byla odečtena síla, kterou působila pružina doteku na siloměr. Hodnoty byly naměřeny v celém měřicím rozsahu doteku, a to celkem 3x s manžetou i bez ní. Z těchto hodnot byl vytvořen graf závislosti velikosti přítlačné síly na zdvihu snímače (obr. 6.1.2) a z něj byly vypočítány závislosti uvedené v tabulce 6.1.2.

Tabulka 6.1.2 Charakteristiky použitých pružin

Pružina	Závislost [N] ⁴	Spolehlivost [%]
0,16 N s manžetou	$0,1775x + 0,5178$	99,22
0,65 N s manžetou	$0,1611x + 0,4091$	96,76
1,6 N s manžetou	$0,1657x + 1,4683$	98,73
4 N s manžetou	$0,3699x + 4,6696$	90,62
0,16 N bez manžety	$0,0144x + 0,1101$	87,4
0,65 N bez manžety	$0,0473x + 0,4834$	93,83
1,6 N bez manžety	$0,1016x + 1,3644$	99,65
4 N bez manžety	$0,3303x + 4,3964$	66,29

Z těchto charakteristik jsou odstraněny krajní hodnoty v místech posuvu -1,5mm. Pro samotný experiment byla zvolena pružina 1,6N s krycí manžetou, zejména proto že se jedná o nejpoužívanější sílu pružiny v průmyslu. Naměřené hodnoty zdvihu pro tuto pružinu jsou uvedeny v příloze C. Po nastavení měřicího doteku v jeho nulové poloze se očekávala přítlačná síla o velikosti 1,474N, která se bude během samotného experimentu měnit pouze minimálně vlivem házení měřicí soustavy, odchylkami tvaru zkoumaného vzorku a vůlí ve snímači.



Obrázek 6.1.2 Charakteristiky pružin

⁴ Kde $x \cong \text{posuv [mm]}$

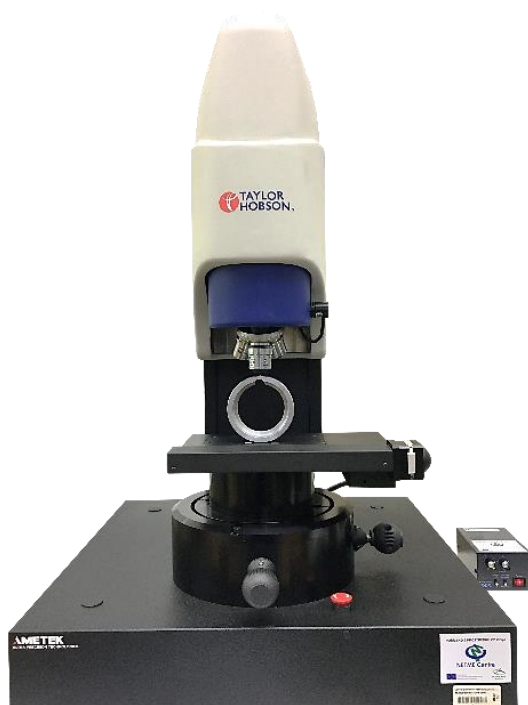
6.2 Postup vyhodnocení opotřebení měřené součásti na CCI

Pro vyhodnocení každého vzorku experimentu bylo na vzorku vybráno několik míst reprezentující poškození vzorku. Všechny měřené plochy byly změřeny na přístroji Taylor Hobson CCI Lite (dále jen CCI) a vyhodnoceny v programu Taly Profile Gold. Měření součásti na CCI zobrazeno na obrázku 6.2.1.

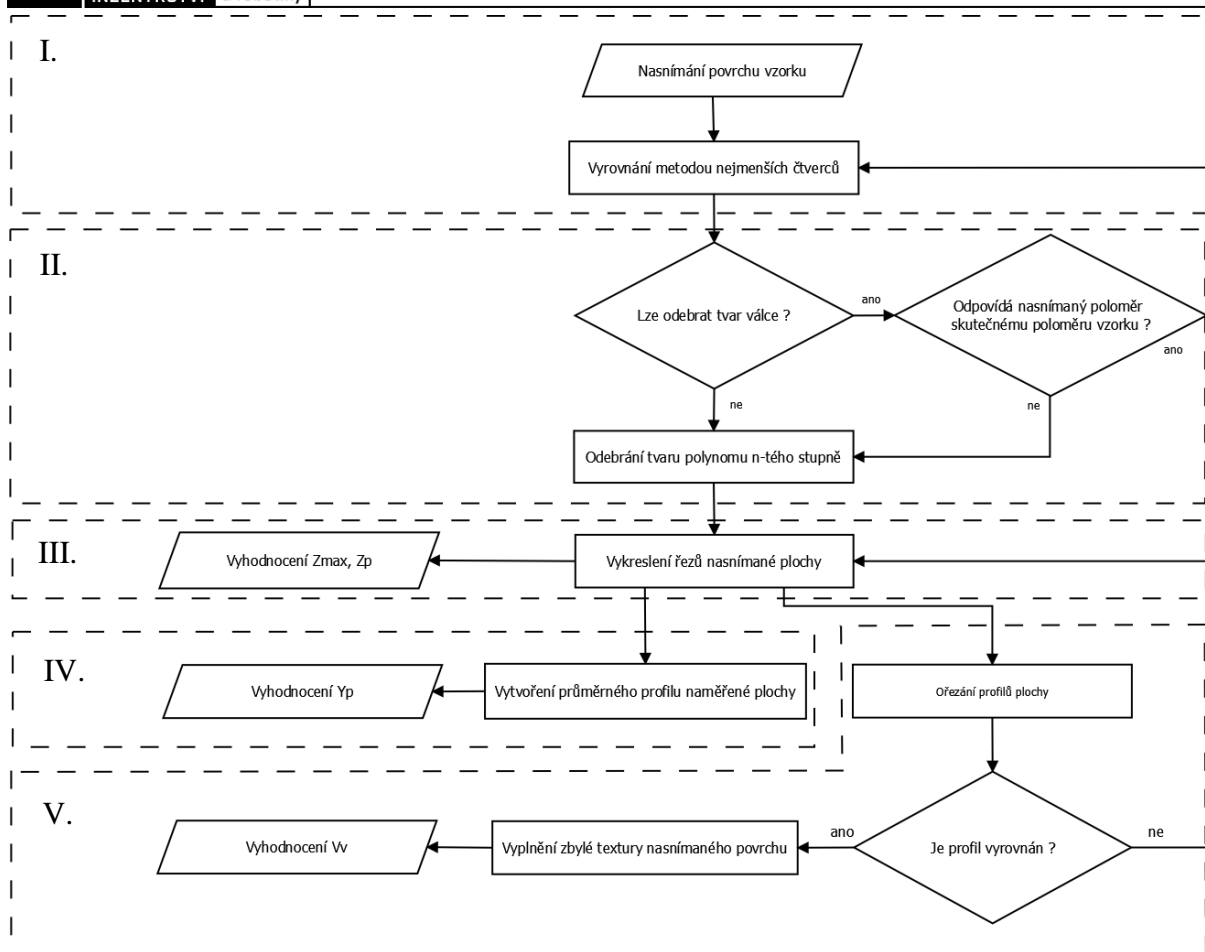
Řezy na vzorku byly vybrány na základě házení experimentálního zařízení v místě kontaktu snímače a měřeného vzorku. Házení může být způsobeno excentricitou řemenic, vůlí v kuželovém uložení hřídele, upínačem vzorků nebo i odchylkou tvaru samotného vzorku. V těchto místech jsou očekávány extrémní opotřebení. Zbylá místa byla vybrána na základě symetrie součásti.

Před samotným měřením byl vzorek důkladně očištěn izopropylalkoholem.

Vyhodnocení poškození měřené součásti bylo provedeno dle následujícího diagramu (obr. 6.2.2)



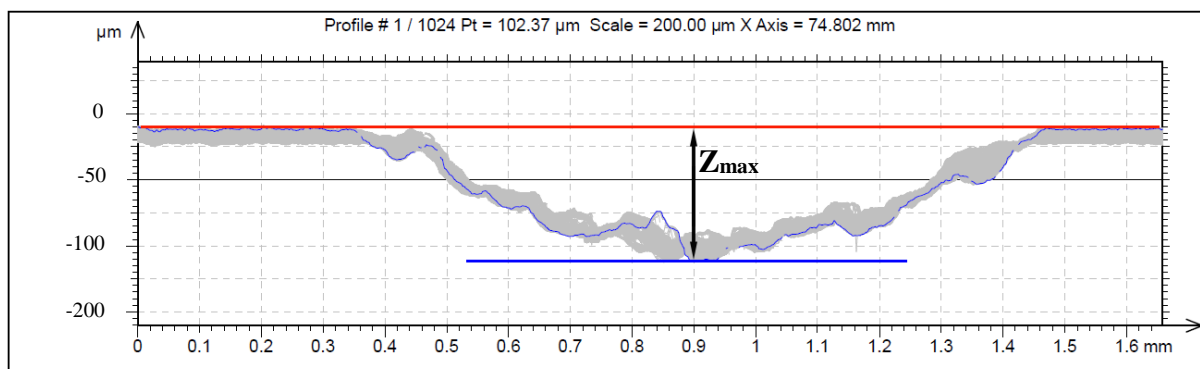
Obrázek 6.2.1 Měření součásti na CCI



Obrázek 6.2.2 Postup vyhodnocení poškození měřené součásti

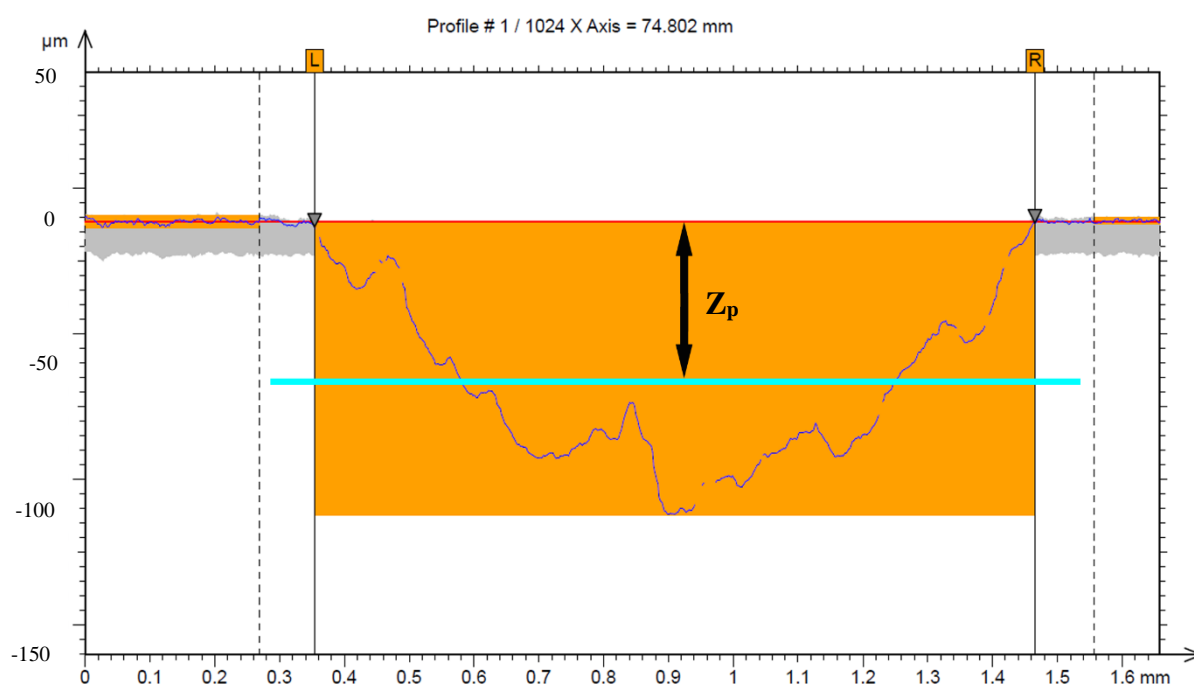
Popis postupu:

- I. Nasnímání a vyrovnnání profilu pomocí metody nejmenších čtverců s vyloučením oblasti opotřebení, tím bylo docíleno vyrovnnání válcové plochy do středu, tedy že vrchol válcové plochy byl zarovnán do středu nasnímané plochy. K této operaci byla použita funkce „leveling“ v programu TalyProfile Gold.
- II. Odebrání tvaru (form removing), vlivem prohlubně způsobené měřicím dotekem nebylo možné odebrat tvar válce, proto je nutné nejdříve vyloučit oblast poškození a z nasnímané plochy odebírat tvar polynomu 2. a vyššího sudého řádu, aby výsledná odebraná plocha co nejvíce odpovídala skutečné válcové ploše.
- III. V dalším kroku bylo extrahováno všech 1024 profilů konkrétní naměřené plochy, ve kterých byla vyhodnocena maximální hloubka prohlubně Z_{max} (obr. 6.2.3). Výpočet toho parametru je dán rovnicí (2). Maximální průměrná hloubka prohlubně Z_p (obr. 6.2.4). Výpočet je dán vztahem (3) a (4), což znamená, že v každém profilu nasnímané plochy byla vypočítána průměrná hloubka opotřebení a největší takto získaná hloubka byla zaznamenána a použita jako parametr opotřebení.



Obrázek 6.2.3 Maximální hloubka prohlubně Z_{max}

$$Z_{max} = \max(|Z_i|) \quad (2)$$

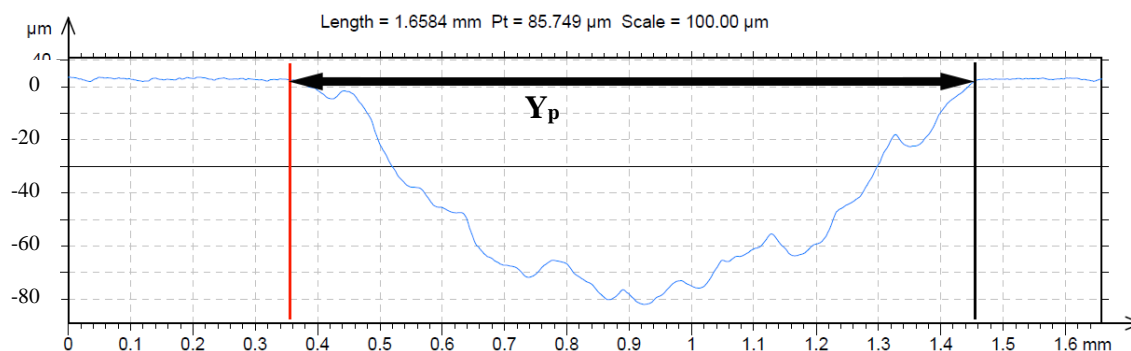


Obrázek 6.2.4 Maximální průměrná hloubka prohlubně

$$Z_p = \max(|Z_{p_i}|) \quad (3)$$

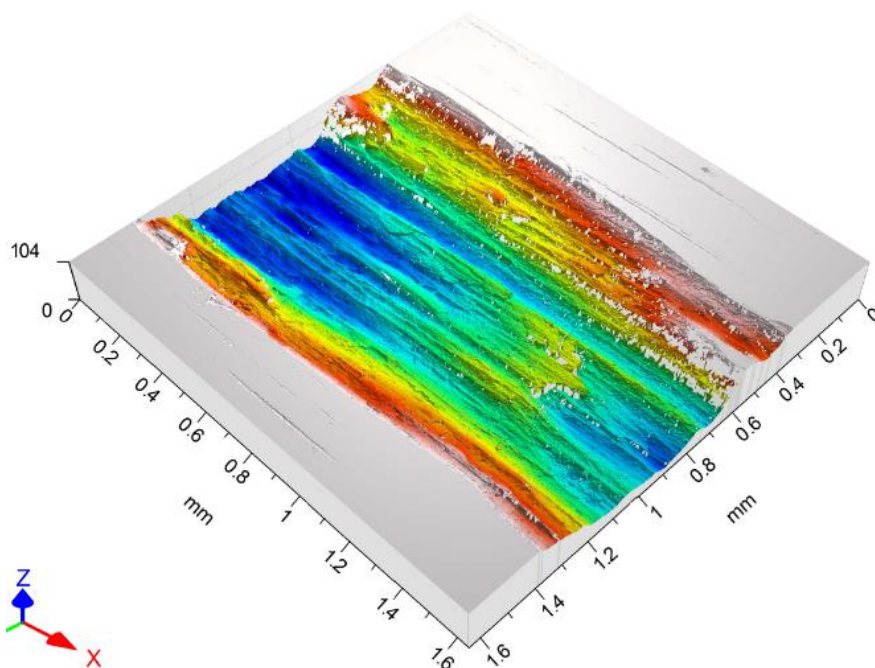
$$Z_{p_i} = \frac{\sum_L^R |Z_i|}{n} \quad (4)$$

- IV. Vytvoření průměrného profilu plochy, na kterém byla změřena průměrná šířka opotřebení Y_p (viz. obr. 6.2.5). Přesnějších výsledků bychom dospěli vyhodnocením šířky v každém z naměřených profilů. Avšak takto by bylo třeba vyhodnotit na jedné měřené součásti pro jeden měřicí dotek až 14 336 profilů, kde by bylo nutné tyto šířky manuálně vyznačit. A právě kvůli časové náročnosti došlo k vyhodnocování šířky pouze z průměrného profilu nasnímané plochy.



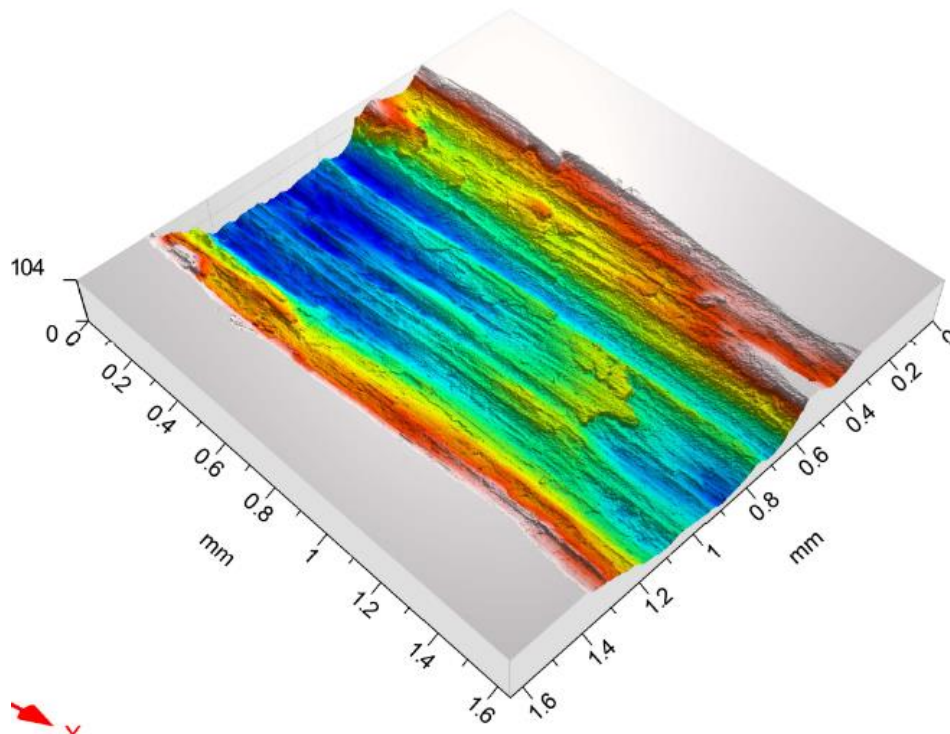
Obrázek 6.2.5 Šířka průměrného profilu

- V. Ořezání naměřené plochy shora funkcí „threshold“, dále jen ořezání. Ořezání bylo provedeno pomocí křivky materiálového poměru v 2. inflexního bodu, čímž je povrch vzorku „ořezán“ pod profil textury povrchu součásti. Prohlubně pod touto plochou byly nazvány „poškození povrchu vzorku“. Podle způsobu ošetření povrchu vzorku bylo nutné odřezávat různá procenta materiálu. Příklad nasnímané plochy po této úpravě je vyobrazen na obr. 6.2.6



Obrázek 6.2.6 Ořezaná plocha povrchu měřené součásti

Dále bylo třeba vyplnit prohlubně nejhlubších míst textury povrchu pomocí funkce „retouch“. Rýhy nezpůsobené měřicím dotekem by jinak ovlivnily výpočet objemových parametrů textury povrchu. Tato úprava změnila pouze místa na ploše mimo poškození povrchu měřicím dotykiem viz. obr. 6.2.7.



Obrázek 6.2.7 Plocha s doplněnými body

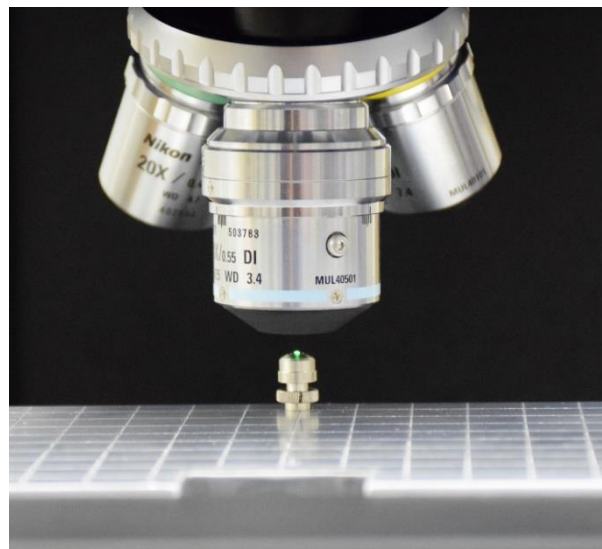
V poslední fázi vyhodnocení byly vypočítány objemové parametry textury povrchu. To bylo možné právě kvůli tomu, že na naměřené ploše nám zůstala pouze prohlubeň způsobená měřicím dotekem. Nejdůležitějším parametrem objemového opotřebení je prázdný objem V_v nasnímané plochy, který se dá vysvětlit jako objem „vzduchu“ nacházející se v nasnímané ploše. Díky předchozí přípravě dat tento objem odpovídá objemu odstraněného materiálu z povrchu měřené součásti.

Příklad vyhodnocení prohlubně v daném řezu na CCI je uveden v příloze D.

6.3 Postup vyhodnocení opotřebení měřicího doteku na CCI

Všechny měřené doteky byly vyhodnoceny na optickém profilometru Taylor Hobson CCI Lite při padesátinásobném zvětšení (obr. 6.3.1) a vyhodnoceny v programu Taly Profile Gold.

Pro vyhodnocení poškození doteku byl vybrán pouze jeho vrchol o průměru 320 μm , z důvodu omezení CCI snímat, takto zakřivenou kulovou plochu (viz. obr. 6.3.3). Zároveň je hodnoceno opotřebení neupraveného doteku, předpokládá se, že pod nánosem materiálu bude dotek abrazivně opotřeben. Avšak toto opotřebení nebude vyhodnoceno, jelikož není pro toto zkoumání relevantní. Dalším omezení této metody vyhodnocení je nemožnost vyhodnotit složení naměřeného „nánosu“, není možné tedy jasně vyhodnotit, zda se jedná o obroušený materiál ze vzorku nebo doteku samotného.



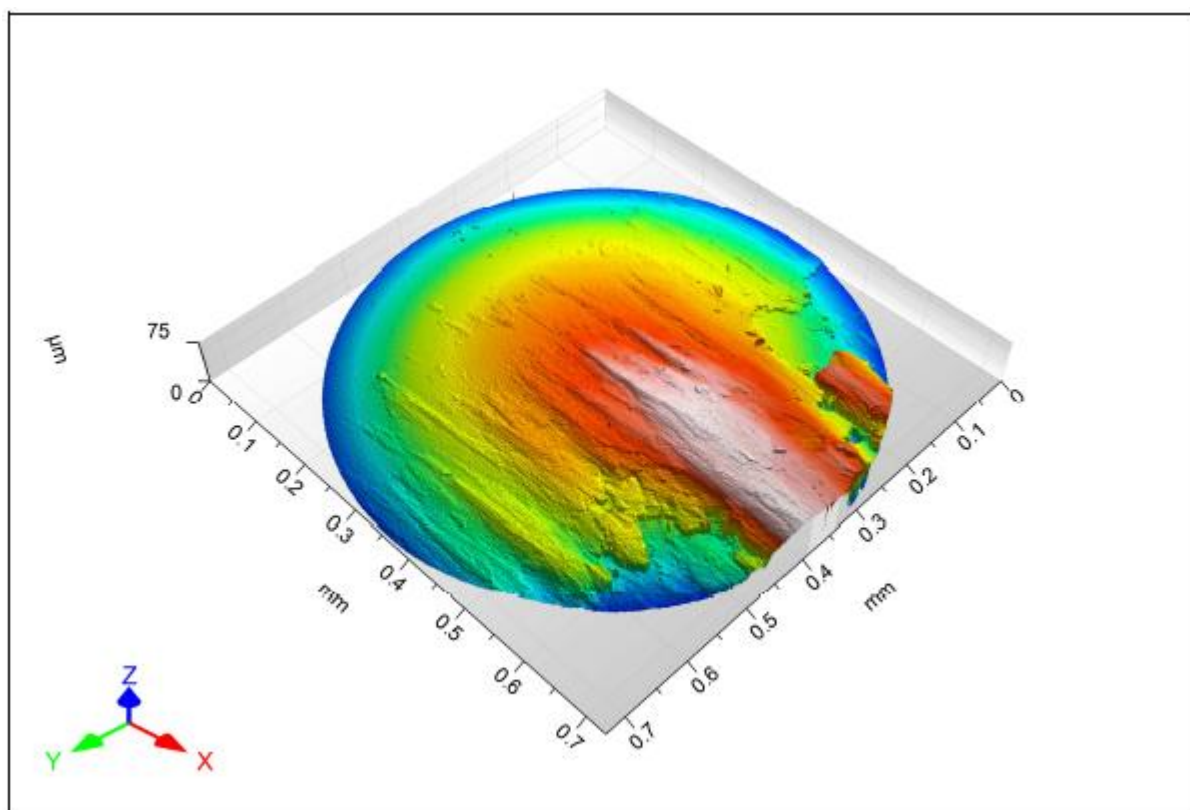
Obrázek 6.3.1 Snímání povrchu kuličky měřicího doteku na CCI

Před samotným měřením byl dotek upnut do držáku, který nám zaručuje upnutí ve stejné poloze, v jaké jsme měřili jeho výchozí stav. Avšak není možné zaručit, že měřená kulička doteku se při samotném experimentu nepootočila. Díky způsobenému opotřebení nelze použitý dotek vycentrovat na místo vrcholu původní koule, což způsobuje následné chyby v odečítání obou vrchlíků.

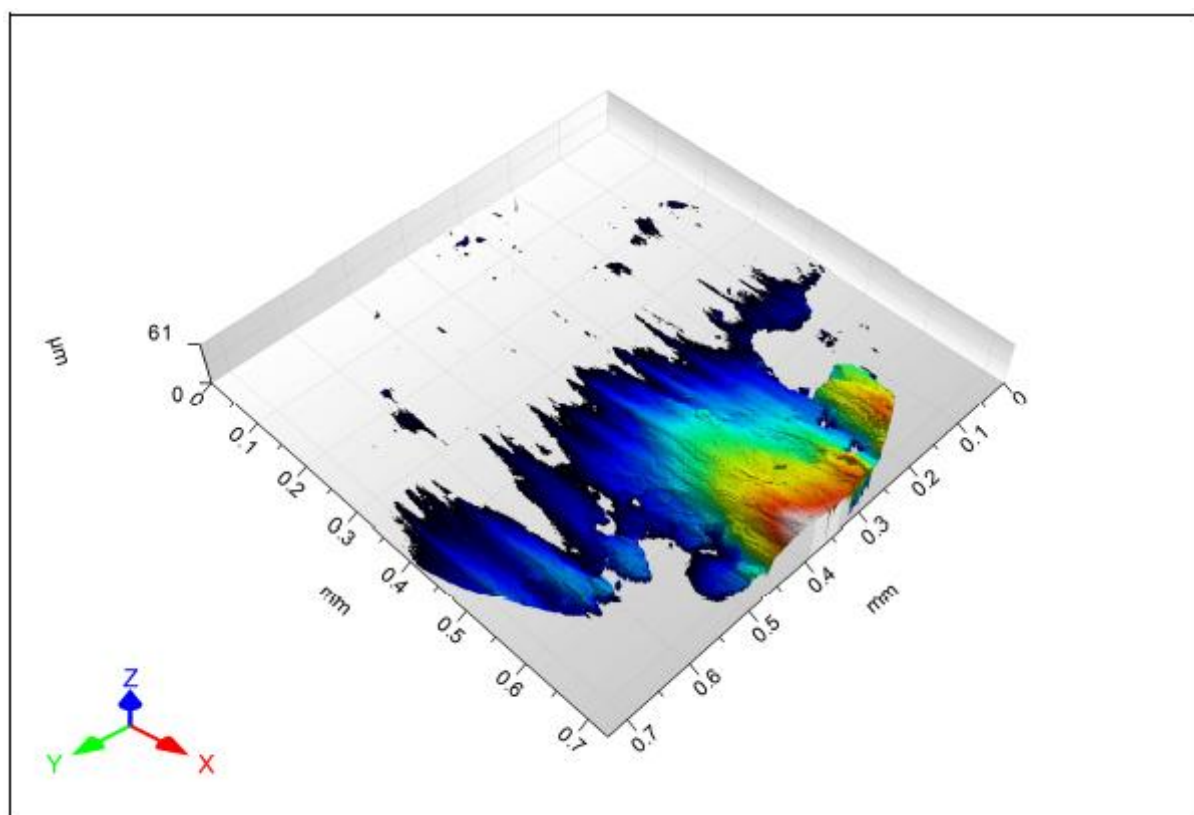
Dotek byl před samotným měřením očištěn izopropylalkoholem.

Každý měřený dotek byl vyhodnocen následujícím postupem:

- I. Naměření výchozího stavu doteku
- II. Naměření stavu doteku po provedeném experimentu
- III. Vyhodnocení
 - Nasnímání plochy kuličky
 - Dopočtení nezměřených bodů
 - Ořezání měřené oblasti na průměr 320 μm (obr. 6.3.3)
 - Odečtení tvaru opotřebeného doteku od jeho původního tvaru
 - Výpočet objemu naneseného a obroušeného materiálu (obr. 6.3.2)



Obrázek 6.3.3 Nasnímaný povrch poškozené kuličky měřicího doteku



Obrázek 6.3.2 Příklad vyfiltrovaného nánosu na kuličce měřicího doteku

7 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

Tato kapitola se zabývá výsledky jednotlivých experimentů. Přehled podmínek experimentů popsaný v 6. kapitole je dále rozšířen o předchozí ošetření povrchu měřené součásti.

Byly zde vyhodnoceny parametry (šířka průměrného profilu Y_p , maximální hloubka prohlubně Z_{max} , prázdný objem prohlubně V_v a průběh sil během experimentu) popsané v kapitolách 6.2 a 6.3.

Dle pokynu vedoucího jsou v celé práci uvedeny pouze naměřené nebo vypočtené hodnoty jednotlivých parametrů poškození textury součástí a měřicího doteku bez stanovování nejistot měření.

7.1 Výsledky experimentu č.1

Tento experiment byl proveden na vzorku AL2. Povrch vzorku byl před zahájením každého experimentu odmaštěn lékařským benzínem. Předpokladem je výrazné poškození povrchu měřené součásti vlivem zvětšeného tření mezi měřeným vzorkem a měřicím dotekem. Lékařský benzín byl zvolen právě kvůli jeho velké odmašťovací schopnosti, která umožnila jasné vyhodnocení vhodnosti příslušného materiálu kuličky měřicího doteku pro materiál dané součásti. Použití tohoto benzínu v průmyslu vidíme jako málo pravděpodobné, z důvodu potřebné konzervace součástí.

Kvůli snímání celých otáček a průměru vzorku je měřená délka stanovena na 359 otáček, což odpovídá délce 100,253 m.

Přítlačná síla snímače je odvozena od pružiny 1,6N s krycí manžetou, v nulové poloze snímače.

V tabulce 7.1.1 jsou uvedeny naměřené hodnoty laboratorních podmínek během provádění experimentu č.1.

Tabulka 7.1.1 Laboratorní podmínky experimentu č.1

Podmínky experimentu		
	Teplota [°C]	Relativní vlhkost vzduchu [%]
	22,8	21,4
	23,1	21,1
	23,1	21,3
	23,4	21,1
	23,4	21,8
	23,5	21,1
xbar	23,22	21,3
R	0,7	0,7
s_x	0,26	0,28

7.1.1 Karbid titanu

V následující tabulce 7.1.2 jsou uvedena experimentálně získaná data opotřebení měřené součásti měřicím dotekem z karbidu titanu. Během celého experimentu bylo dbáno na dodržování podmínek uvedených v kapitole 6.1 a 7.1.

Tabulka 7.1.2 Hodnoty poškození vzorku AL1, odmaštěno lékařským benzínem, měřicí dotek karbidu titanu

	F_{\max} [N]	F_{\min} [N]	Y_p [mm]	Z_{\max} [μ m]	Z_p [μ m]	V_v [mm^3/mm^2]
místo	1		0,9175	70,029	43,462	0,019923
	2		0,9662	73,285	45,949	0,020941
	3		0,8284	59,875	29,685	0,013162
	4		0,8949	51,758	27,092	0,010423
	5		0,9483	65,584	40,425	0,016081
	6		0,8949	68,378	36,965	0,016804
	7		0,9402	79,248	52,619	0,023625
	8		0,9175	70,094	42,578	0,015677
	9		0,9759	84,018	48,324	0,022452
	10		0,9321	64,400	39,081	0,017875
x_{\max}	1,475		0,9759	84,02	52,619	0,023625
x_{\min}	1,465		0,8284	51,76	27,092	0,010423
R	0,010		0,1475	32,26	25,527	0,013202
\bar{x}	1,470		0,9216	68,67	40,618	0,017696
s_x	0,007		0,0425	9,21	7,902	0,004140

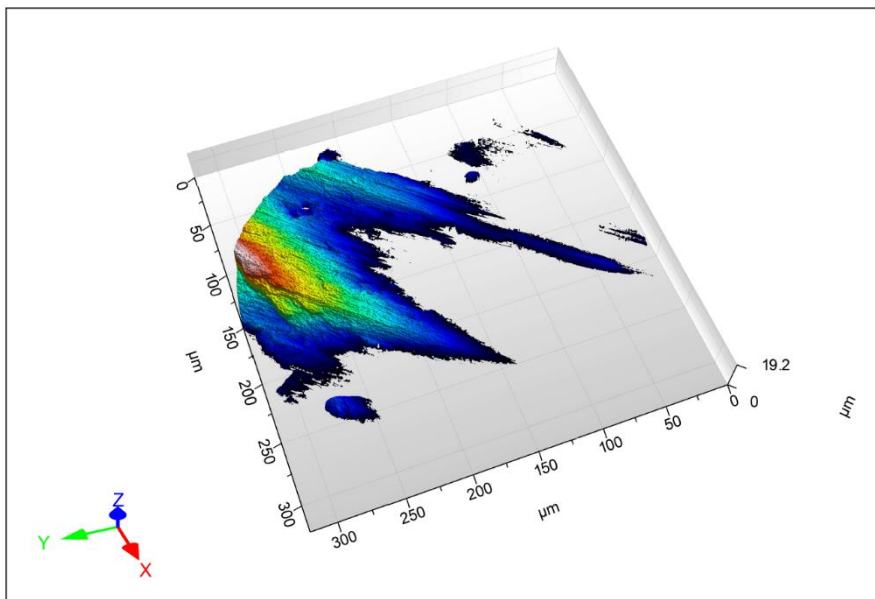
Snímač byl nastaven v kontaktu se vzorkem na výchozí posuv -0,003 mm. Síla v tomto místě je 1,468 N. Během měření byla zaznamenána minimální výchylka snímače -0,021 mm a maximální výchylka +0,041 mm. Tudíž očekávaná variabilita přitlačné síly je 1,465N – 1,475 N.

Největší naměřená šířka prohlubně průměrného profilu způsobená měřicím dotykem byla změřena v řezu číslo 9 kde $Y_p = 0,9759 \text{ mm}$. Na základě naměřených dat byla průměrná šířka prohlubně průměrného profilu $\bar{Y}_p = 0,9216 \text{ mm}$, s rozpětí $R_{Y_p} = 0,1475 \text{ mm}$ a směrodatná odchylka $s_{Y_p} = 0,0425 \text{ mm}$.

Dále byla vyhodnocena maximální hloubka prohlubně. Největší maximální hloubka prohlubně byla naměřena v řezu číslo 9, ve kterém $Z_{\max} = 84,018 \mu\text{m}$, průměrná maximální hloubka byla $\bar{Z}_{\max} = 68,67 \mu\text{m}$, rozpětí $R_{Z_{\max}} = 32,26 \mu\text{m}$ a směrodatná odchylka $s_{Z_{\max}} = 9,21 \mu\text{m}$. Stejným způsobem byla vyhodnocena i průměrná hloubka prohlubně Z_p jejíž maximum se nacházelo v řezu číslo 7.

Parametr prázdného objemu V_v , který zohledňuje všechny předchozí rozměrové parametry opotřebení měřené součásti. Největší naměřená hodnota prázdného objemu se nacházela v 7. řezu a činila $V_v = 0,023625 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$. Průměrná hodnota prázdného objemu pro danou prohlubeň je $\bar{V}_v = 0,017696 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$, rozpětí hodnot bylo $R_{V_v} = 0,013202 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$ a směrodatná odchylka $s_{V_v} = 0,004140 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$.

Vyhodnocením poškození měřicího doteku bylo zjištěno, že na kuličku se nanese materiál z měřené součásti (obr. 7.1.1). Objem tohoto materiálu je $69\,246\,\mu\text{m}^3$ s maximální výškou $11,502\,\mu\text{m}$ nad úroveň původního vrcholu kuličky měřicího doteku.



Obrázek 7.1.1 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z karbidu titanu

7.1.2 Nitrid křemíku

V následující tabulce 7.1.3 jsou uvedena data pro opotřebení měřené součásti měřicím dotekem z karbidu titanu. Kdy během celého experimentu bylo dbáno na dodržování podmínek uvedené v kapitole 6.1 a doplnění podmínek z kapitoly 7.1.

Tabulka 7.1.3 Hodnoty poškození vzorku AL1, odmaštěno lékařským benzínem, měřicí dotek nitridu křemíku

		F _{max} [N]	F _{min} [N]	Y _p [mm]	Z _{max} [μm]	Z _p [μm]	V _v [mm ³ /mm ²]
místo	1	1,474	1,465	0,86891	52,445	38,628	0,011849
	2			0,97428	87,427	53,403	0,027646
	3			0,96455	91,905	55,669	0,029515
	4			0,96131	78,543	51,1	0,021774
	5			0,91268	64,862	41,379	0,016565
	6			0,91754	77,03	46,286	0,019114
	7			0,9175	77,486	47,486	0,018848
	8			0,9175	74,600	47,692	0,021152
	9			0,8641	62,444	37,029	0,016074
	10			0,8527	54,589	34,675	0,013445
x _{max}	1,474		0,9743	91,91	55,669	0,029515	
x _{min}	1,465		0,8527	52,45	34,675	0,011849	
R	0,009		0,1216	39,46	20,994	0,017666	
xbar	1,470		0,9151	72,13	45,335	0,019598	
s _x	0,006		0,0431	13,19	7,145	0,005682	

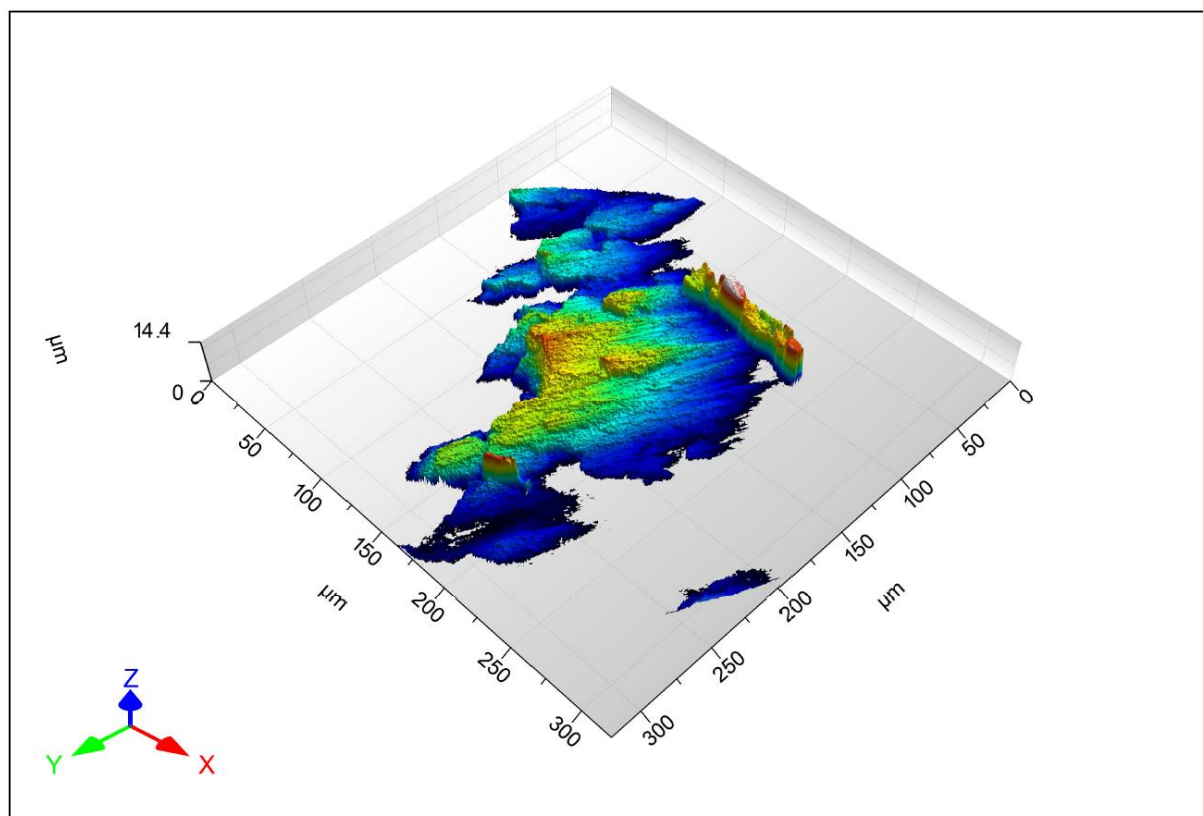
Snímač byl nastaven v kontaktu se vzorkem na výchozí posuv 0,000 mm. Síla v tomto místě je tedy 1,468 N. Během měření byla změřena minimální výchylka snímače -0,020 mm a maximální výchylka snímače +0,034 mm. Tudiž očekávaná variabilita přitlačné síly je 1,465 – 1,474 N.

Největší naměřená šířka prohlubně průměrného profilu způsobená měřicím dotykem byla změřena v řezu číslo 2 kde $Y_p = 0,97428 \text{ mm}$. Na základě naměřených dat byla průměrná šířka prohlubně průměrného profilu $\bar{Y}_p = 0,9151 \text{ mm}$, rozpětí $R_{Y_p} = 0,1216 \text{ mm}$ a směrodatná odchylka $s_{Y_p} = 0,0431 \text{ mm}$.

Dále byla vyhodnocena maximální hloubka prohlubně. Největší maximální hloubka prohlubně byla naměřena v řezu číslo 3, ve kterém $Z_{\max} = 91,905 \mu\text{m}$, průměrná maximální hloubka byla potom $\bar{Z}_{\max} = 72,13 \mu\text{m}$, rozpětí $R_{Z_{\max}} = 39,46 \mu\text{m}$ a směrodatná odchylka $s_{Z_{\max}} = 13,19 \mu\text{m}$. Stejným způsobem byla vyhodnocena i průměrná hloubka prohlubně Z_p jejíž maximum se nacházelo taktéž v řezu číslo 3.

Největší naměřená hodnota prázdného objemu se nacházela ve 3. řezu a činila $V_V = 0,029515 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$. Průměrná hodnota prázdného objemu pro danou prohlubeň je $\bar{V}_V = 0,019598 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$, rozpětí $R_{V_V} = 0,017666 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$ a směrodatná odchylka $s_{V_V} = 0,005682 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$.

Vyhodnocením poškození měřicího doteku bylo zjištěno, že na kuličku se nanese materiál z měřené součásti (obr. 7.1.2). Objem tohoto materiálu je $91\,912 \mu\text{m}^3$ s maximální výškou $13,290 \mu\text{m}$ nad úroveň původního vrcholu kuličky měřicího doteku.



Obrázek 7.1.2 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z nitridu křemíku

7.1.3 Zirkonium

V následující tabulce 7.1.4 jsou uvedeny data pro opotřebení součásti měřicím dotekem z karbidu titanu. Kdy během celého experimentu bylo dbáno na dodržování podmínek uvedené v kapitole 6.1 a doplnění podmínek z kapitoly 7.1.

Tabulka 7.1.4 Hodnoty poškození vzorku AL1, odmaštěno lékařským benzínem, měřicím dotek zirkonium

	F_{\max} [N]	F_{\min} [N]	Y_p [mm]	Z_{\max} [μm]	Z_p [μm]	V_v [mm³/mm²]	
místo	1	1,473	1,466	0,96618	96,825	49,263	0,022742
	2			0,99049	76,426	42,731	0,022483
	3			0,95159	84,311	53,764	0,021478
	4			0,88998	69,197	45,725	0,018804
	5			0,96780	101,750	60,620	0,032178
	6			0,98725	93,260	52,498	0,028451
	7			0,94834	89,191	52,174	0,026452
	8			0,96131	96,257	62,480	0,023358
	9			0,91754	66,772	37,214	0,010945
	10			0,92078	74,760	44,731	0,017478
x_{\max}	1,473		0,9905	101,75	62,480	0,032178	
x_{\min}	1,466		0,8900	66,77	37,214	0,010945	
R	0,007		0,1005	34,98	25,266	0,021233	
xbar	1,470		0,9501	84,87	50,120	0,022437	
s_x	0,005		0,0321	12,44	7,863	0,005953	

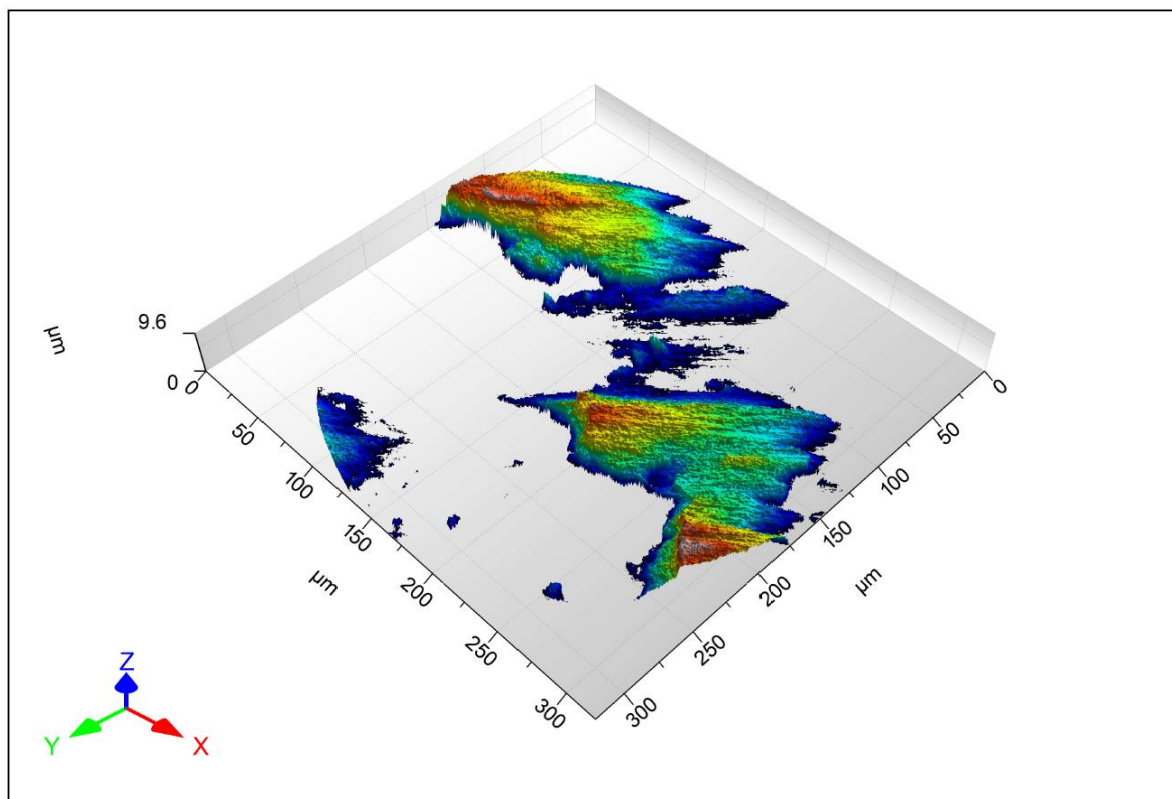
Snímač byl nastaven v kontaktu se vzorkem na výchozí posuv -0,004 mm. Síla v tomto místě je tedy 1,468 N. Během měření byla naměřena minimální výchylka snímače -0,012 mm a maximální výchylka +0,030 mm. Tudíž očekávaná variabilita přitlačné síly je 1,466 – 1,473 N.

Největší naměřená šířka prohlubně průměrného profilu způsobená měřicím dotykem byla změřena v řezu číslo 2 kde $Y_p = 0,99049$ mm. Na základě naměřených dat byla průměrná šířka prohlubně průměrného profilu $\bar{Y}_p = 0,9501$ mm, rozpětí $R_{Y_p} = 0,1005$ mm a směrodatná odchylka $s_{Y_p} = 0,0321$ mm.

Dále byla vyhodnocena maximální hloubka prohlubně. Největší maximální hloubka prohlubně byla naměřena v řezu číslo 5, ve kterém $Z_{\max} = 101,75$ μ m, průměrná maximální hloubka $\bar{Z}_{\max} = 84,87$ μ m, S rozpětí $R_{Z_{\max}} = 34,98$ μ m a směrodatná odchylka $s_{Z_{\max}} = 12,44$ μ m. Stejným způsobem byla vyhodnocena i průměrná hloubka prohlubně Z_p jejíž maximum se nacházelo taktéž v řezu číslo 8.

Největší naměřená hodnota prázdného objemu se nacházela ve 5. řezu a činila $V_V = 0,032178$ mm³ · mm⁻². Průměrná hodnota prázdného objemu pro danou prohlubeň je $\bar{V}_V = 0,022437$ mm³ · mm⁻², rozpětí $R_{V_V} = 0,021233$ mm³ · mm⁻² a směrodatná odchylka $s_{V_V} = 0,005953$ mm³ · mm⁻².

Vyhodnocením poškození měřicího doteku bylo zjištěno, že i v tomto případě se na kuličku nanasíl materiál z měřené součásti (obr. 7.1.3). Objem tohoto materiálu je $36\,005\mu\text{m}^3$ s maximální výškou $7,2031\,\mu\text{m}$ nad úroveň původního vrcholu kuličky měřicího doteku.



Obrázek 7.1.3 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku ze zirkonia

7.1.4 Ložisková ocel

V tabulce 7.1.5 jsou uvedeny data opotřebení měřené součásti dotekem z ložiskové oceli. Kdy během celého experimentu bylo dbáno na dodržování podmínek uvedené v kapitole 6.1 a doplnění podmínek z kapitoly 7.1.

Tabulka 7.1.5 Hodnoty poškození vzorku AL1, odmaštěno lékařským benzínem, měřící dotek ložiskové oceli 14 109

	F _{max} [N]	F _{min} [N]	Y _p [mm]	Z _{max} [μm]	Z _p [μm]	Vv [mm³/mm²]	
místo	1	1,475	1,467	0,91916	70,695	36,041	0,014254
	2			0,94186	81,248	48,927	0,023677
	3			0,8527	75,833	45,387	0,013557
	4			0,92403	74,73	43,02	0,015911
	5			0,93537	68,707	39,088	0,017609
	6			0,95807	77,273	48,601	0,016088
	7			0,9516	81,15	50,433	0,023393
	8			0,9257	78,83	46,244	0,017957
	9			0,9175	86,93	55,246	0,023038
	10			0,9030	70,71	38,496	0,016633
x _{max}	1,475		0,9581	86,93	55,246	0,023677	
x _{min}	1,467		0,8527	68,71	36,041	0,013557	
R	0,006		0,1054	18,22	19,205	0,010120	
xbar	1,471		0,9229	76,61	45,148	0,018212	
s _x	0,004		0,0297	5,68	6,017	0,003801	

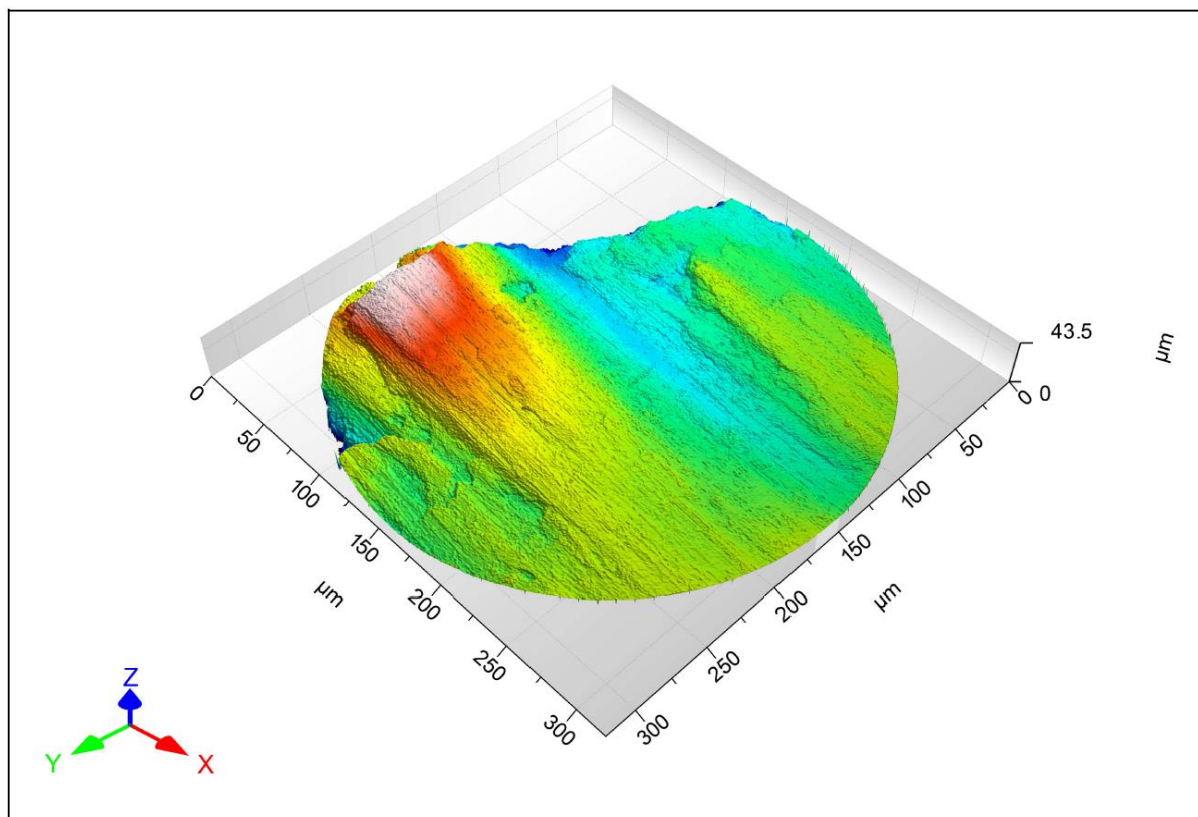
Snímač byl nastaven v kontaktu se vzorkem na výchozí posuv 0 mm. Síla v tomto místě je tedy 1,468 N. Během měření byla naměřena minimální výchylka snímače -0,007 mm a maximální výchylky +0,038 mm. Tudíž očekávaná variabilita přítláčné síly je 1,467 – 1,475 N.

Největší naměřená šířka prohlubně průměrného profilu způsobená měřícím dotykem byla změřena v řezu číslo 6 kde $Y_p = 0,95807 \text{ mm}$. Na základě naměřených dat byla průměrná šířka prohlubně průměrného profilu $\bar{Y}_p = 0,9229 \text{ mm}$, s rozpětí $R_{Y_p} = 0,1054 \text{ mm}$ a směrodatná odchylka $s_{Y_p} = 0,0297 \text{ mm}$.

Největší maximální hloubka prohlubně byla naměřena v řezu číslo 9, ve kterém $Z_{\max} = 86,93 \text{ μm}$, průměrná maximální hloubka $\bar{Z}_{\max} = 76,61 \text{ μm}$, rozpětí $R_{Z_{\max}} = 18,22 \text{ μm}$ a směrodatná odchylka $s_{Z_{\max}} = 5,68 \text{ μm}$. Stejným způsobem byla vyhodnocena i průměrná hloubka prohlubně Z_p jejíž maximum se nacházelo taktéž v řezu číslo 9.

Největší naměřená hodnota prázdného objemu se nacházela ve 2. řezu a byla rovna $V_V = 0,023677 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$. Průměrná hodnota prázdného objemu pro danou prohlubeň je $\bar{V}_V = 0,018212 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$, rozptyl hodnot byl $R_{V_V} = 0,010120 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$ a směrodatná odchylka $s_{V_V} = 0,003801 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$.

Bylo zjištěno, že na kuličku se taktéž nanese materiál z měřené součásti (obr. 7.1.4). Objem tohoto materiálu je $36\,005\mu\text{m}^3$ s maximální výškou $42,268\,\mu\text{m}$ nad úroveň původního vrcholu kuličky měřicího doteku.



Obrázek 7.1.4 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z ložiskové oceli

7.1.5 Rubín

V následující tabulce 7.1.6 jsou uvedena data opotřebení součástí měřicím dotekem z rubínu. Kdy během celého experimentu bylo dbáno na dodržování podmínek uvedené v kapitole 6.1 a doplnění podmínek z kapitoly 7.1.

Tabulka 7.1.6 Hodnoty poškození vzorku AL1, odmaštěno lékařským benzínem, měřicí dotek rubínu

		F _{max} [N]	F _{min} [N]	Y _p [mm]	Z _{max} [μm]	Z _p [μm]	V _v [mm ³ /mm ²]
místo	1	1,472	1,467	0,89485	67,676	40,705	0,017155
	2			0,92727	76,009	47,319	0,023636
	3			0,89485	60,973	37,703	0,017627
	4			0,86891	73,112	43,438	0,014741
	5			0,89647	75,136	41,463	0,019835
	6			0,87215	64,494	43,428	0,015418
	7			0,87053	70,761	43,615	0,019844
	8			0,87377	69,344	41,120	0,018656
	9			0,88836	76,547	44,147	0,019464
	10			0,89323	78,894	39,893	0,017091
x _{max}	1,472		0,9273	78,894	47,319	0,023636	
x _{min}	1,467		0,8689	60,973	37,703	0,014741	
R	0,005		0,0584	17,921	9,616	0,008895	
xbar	1,470		0,8880	71,295	42,283	0,018347	
s _x	0,004		0,0178	5,731	2,676	0,002558	

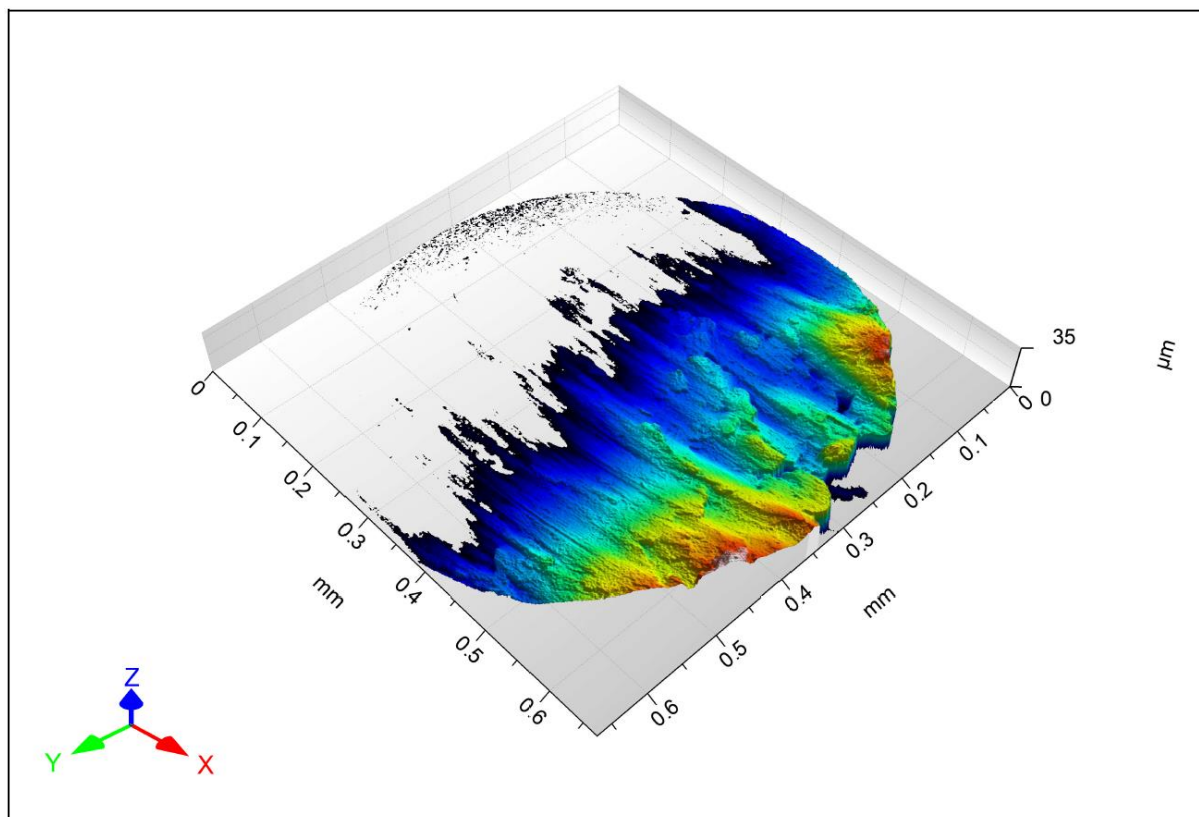
Snímač byl nastaven v kontaktu se vzorkem na výchozí posuv +0,004 mm. Síla v tomto místě je tedy 1,469 N. Během měření byla naměřena minimální výchylka snímače -0,007 mm a maximální +0,024 mm. Tudíž očekávaná variabilita přitlačné síly je 1,467 – 1,472 N.

Největší naměřená šířka prohlubně průměrného profilu způsobená měřicím dotykem byla změřena v řezu číslo 2, kde $Y_p = 0,92727 \text{ mm}$, průměrná šířka prohlubně průměrného profilu $\bar{Y}_p = 0,8880 \text{ mm}$, rozpětí $R_{Y_p} = 0,0584 \text{ mm}$ a směrodatná odchylka $s_{Y_p} = 0,0178 \text{ mm}$.

Největší maximální hloubka prohlubně byla naměřena v řezu číslo 10, ve kterém $Z_{\max} = 78,894 \mu\text{m}$, průměrná maximální hloubka $\bar{Z}_{\max} = 71,295 \mu\text{m}$, rozpětí $R_{Z_{\max}} = 17,921 \mu\text{m}$ a směrodatná odchylka $s_{Z_{\max}} = 5,731 \mu\text{m}$. Stejným způsobem byla vyhodnocena i průměrná hloubka prohlubně Z_p jejíž maximum se nacházelo taktéž v řezu číslo 2.

Největší naměřená hodnota prázdného objemu se nacházela ve 2. řezu a byla $V_v = 0,023636 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$, průměrná hodnota prázdného objemu pro danou prohlubeň byla $\bar{V}_v = 0,018347 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$, rozpětí $R_{V_v} = 0,008895 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$ a směrodatná odchylka $s_{V_v} = 0,002558 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$.

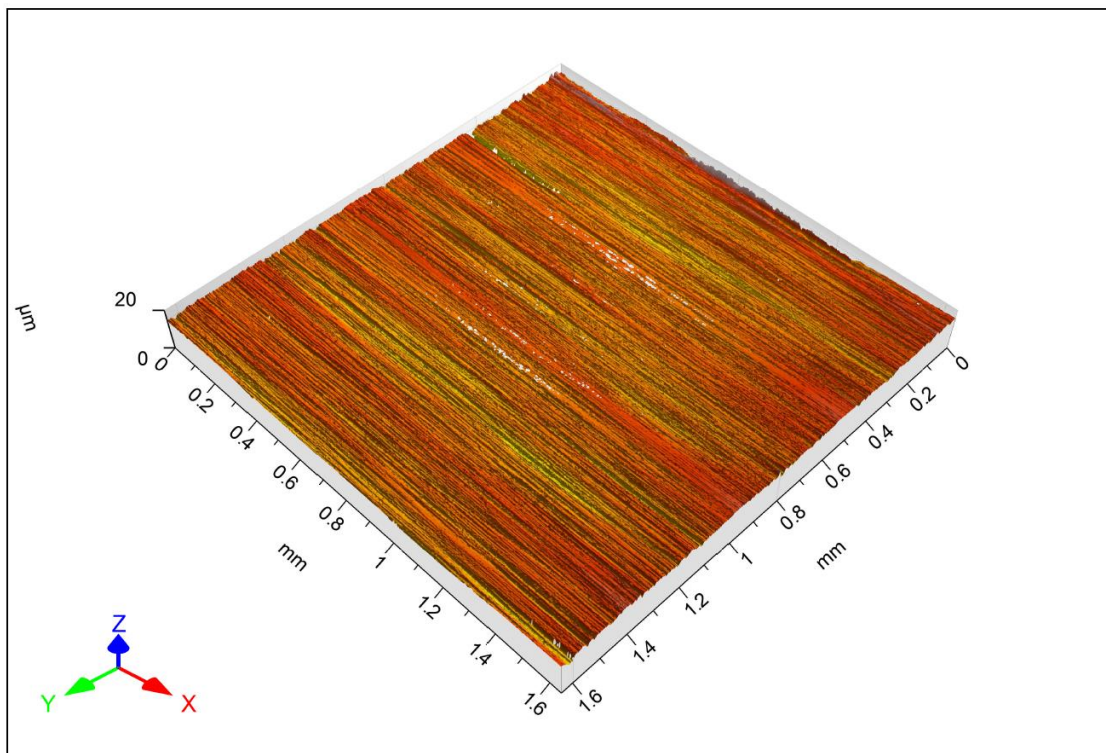
Na základě vyhodnocení poškození měřicího doteku se konstatuje, že na kuličku rubínu se taktéž nanese materiál z měřené součásti (obr. 7.1.5). Objem tohoto materiálu je $626\,223\mu\text{m}^3$ s maximální výškou $30,402\,\mu\text{m}$ nad úroveň původního vrcholu kuličky měřicího doteku.



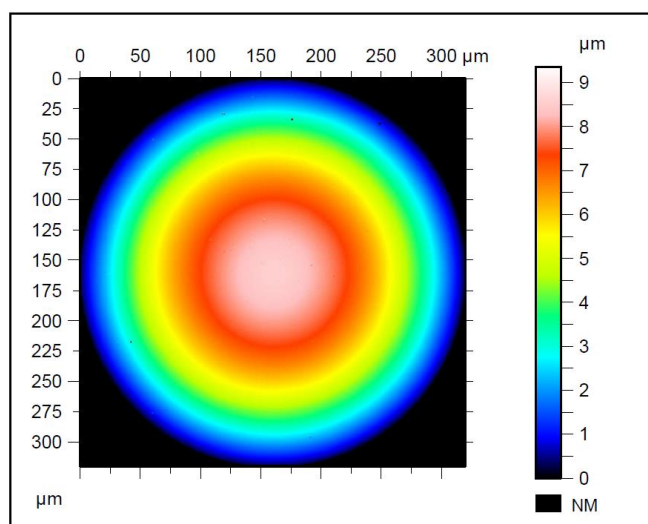
Obrázek 7.1.5 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z rubínu

7.1.6 Nanokrystalický diamant

Povrch měřené součásti ani měřicího doteku nenesou žádné známky opotřebení. Dráha na měřené součásti je sice místy okem viditelná, avšak z naměřených profilů není možné jednoznačně určit, kudy vedla dráha snímače. Oblast povrchu měřené součásti, kde proběhlo měření pomocí snímače s dotekem je zobrazeno na obrázku 7.1.6. Stejně tak je na obrázku 7.1.7 zobrazen měřicí dotek po provedení experimentu. Z těchto důvodů opotřebení vzniklé tímto dotekem není možné vyhodnotit.



Obrázek 7.1.6 Povrch měřené součásti po provedení experimentu s nanokrystalickým diamantem



Obrázek 7.1.7 Povrch měřicího doteku z nanokrystalického diamantu po provedení experimentu

7.2 Výsledky experimentu č.2

Tento experiment byl proveden na vzorku AL1. Povrch vzorku před zahájením experimentu odmaštěn lékařským benzínem a dále na něj byla nanесena malá vrstva isoparafinu.

Isoparafín se v průmyslu používá na čištění a konzervaci vyrobených součástí v automatických pračkách, kde je za zvýšené teploty nanášen na čištěné součásti pomocí páry. Dle dostupných informací je proces čištění součástí zařazen před samotný proces kontroly. Z toho důvodu považujeme za vhodné nadefinovat během experimentu stejné podmínky, jaké jsou v průmyslu během sériové výroby. [22]

Předpokladem je menší poškození povrchu vzorku než u vzorku odmaštěného lékařským benzínem. Jelikož čistící kapalina obsahující isoparafín obsahuje i minerální olej. Díky čemu bylo očekáváno snížení tření mezi měřeným vzorkem a měřicím dotekem. Během experimentu je dbáno na dodržování zde stanovených podmínek a podmínek z kapitoly 6.2.

Kvůli snímání celých otáček a průměru vzorku byla měřená délka stanovena na 360 otáček, což odpovídá délce 100,215m.

Přítlačná síla snímače je odvozena od pružiny 1,6N s krycí manžetou, v nulové poloze snímače.

Během experimentu byly naměřeny následující podmínky:

Tabulka 7.2.1 Laboratorní podmínky experimentu

Podmínky experimentu		
	Teplota [°C]	Relativní vlhkost vzduchu [%]
	23,1	21,4
	23,2	21,1
	23,2	21,3
	23,4	21,1
	23,5	21,8
	23,5	21,1
xbar	23,32	21,3
R	0,4	0,7
s_x	0,17	0,28

Díky tabulce 7.2.1 je možné konstatování že experiment proběhl v laboratoři s konstantními podmínkami, jelikož teplota v laboratoři se pohybovala od 23,1°C do 23,5°C a to v průběhu 6ti hodin.

Tabulka 7.2.2 Rychlost otáčení měřené součásti během experimentu

Rychlost otáčení měřené součásti (RPM)									
30,113	29,17	30,554	29,234	28,253	28,856	29,113	30,001	28,997	29,175
				RPM	29,3466				
				R	2,301				
				S_{ot}	0,6799				

V tabulce 7.2.2 jsou zaznamenány údaje o rychlosti otáčení měřené součásti během všech měření v rámci experimentu číslo 2.

7.2.1 Karbid titanu

V následující tabulce 7.2.3 jsou uvedena data opotřebení součásti měřicím dotekem z karbidu titanu.

Tabulka 7.2.3 Naměřené hodnoty parametrů poškození vzorku AL1, ošetření isoparafinem, měřicí dotek karbidu titanu

		F _p [N]	F _k [N]	Y _p [mm]	Z _{max} [μm]	Z _p [μm]	V _v [mm³/mm²]
misto	1	1,468	1,464	1,031	105,92	58,221	0,024865
	2	1,471	1,468	1,0229	113,23	69,443	0,029673
	3	1,476	1,465	1,0651	126,91	72,897	0,043605
	4	1,482	1,473	1,0262	105,64	66,014	0,030462
	5	1,487	1,480	1,078	121,57	77,788	0,047452
	6	1,490	1,487	1,0813	125	68,749	0,032139
	7	1,491	1,482	1,1186	123,83	71,99	0,045127
	8	1,489	1,481	1,0618	109,11	66,894	0,034851
	9	1,485	1,477	1,0926	124,42	81,073	0,030205
	10	1,481	1,468	1,0586	112,9	72,755	0,024665
	11	1,475	1,476	1,0894	114,29	70,394	0,040649
	12	1,471	1,467	0,937	73,695	34,549	0,013369
	13	1,468	1,468	1,1023	112,03	65,36	0,040561
	14	1,468	1,463	1,0942	114,95	76,249	0,046217
x _{max}	1,491		1,1186	126,910	81,073	0,047452	
x _{min}	1,463		0,9370	73,695	34,549	0,013369	
R	0,027		0,1816	53,215	46,524	0,034083	
x _{bar}	1,476		1,0614	113,107	68,027	0,034560	
s _x	0,009		0,0461	13,386	11,206	0,009904	

Během první otáčky měřené součásti byla největší naměřená síla v řezu číslo 7 a to $F_p = 1,491 \text{ N}$, největší síla během poslední otáčky byla v řezu číslo 6 a to $F_k = 1,487 \text{ N}$. Je tedy patrné, že přitlačná síla se během experimentu nijak výrazně nezměnila. Průměrná přitlačná síla během tohoto experimentu byla $\bar{F} = 1,476 \text{ N}$, rozpětí $R_F = 0,027 \text{ N}$ a směrodatná odchylka $s_F = 0,009 \text{ N}$.

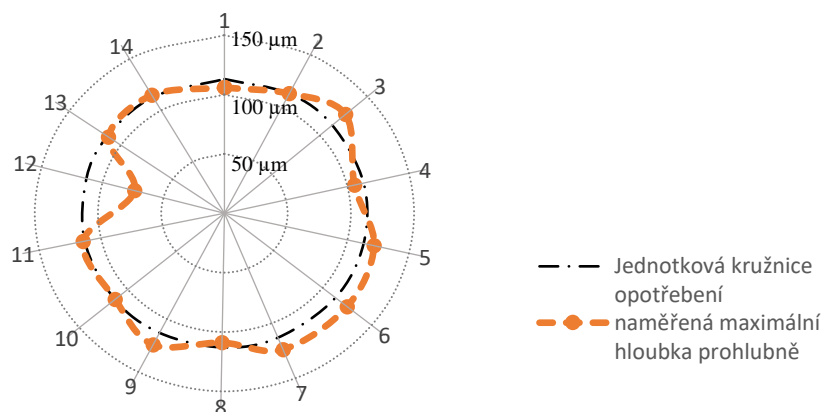
Největší naměřená šířka prohlubně průměrného profilu způsobená měřicím dotykem byla změřena v řezu číslo 7, kde $Y_p = 1,1186 \text{ mm}$, průměrná šířka prohlubně průměrného profilu $\bar{Y}_p = 1,0614 \text{ mm}$, rozpětí $R_{Y_p} = 0,1816 \text{ mm}$ a směrodatná odchylka $s_{Y_p} = 0,0461 \text{ mm}$.

Největší maximální hloubka prohlubně byla naměřena v řezu číslo 3, ve kterém $Z_{max} = 126,91 \mu\text{m}$, průměrná maximální hloubka byla $\bar{Z}_{max} = 113,107 \mu\text{m}$, rozpětí $R_{Z_{max}} = 53,215 \mu\text{m}$ a směrodatná odchylka $s_{Z_{max}} = 13,386 \mu\text{m}$. Stejným způsobem byla vyhodnocena i průměrná hloubka prohlubně Z_p jejíž maximum se nacházelo v řezu číslo 9.

Největší důraz je kladen na parametr prázdného objemu V_v , který zohledňuje všechny předchozí rozměrové parametry opotřebení měřené součásti. Největší naměřená hodnota prázdného objemu se nacházela v 5. řezu a činila $V_v = 0,047452 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$. Průměrná hodnota prázdného objemu pro danou prohlubeň je $\bar{V}_v = 0,03456 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$, rozptyl hodnot byl $R_{V_v} = 0,034083 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$ a směrodatná odchylka $s_{V_v} = 0,009904 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$.

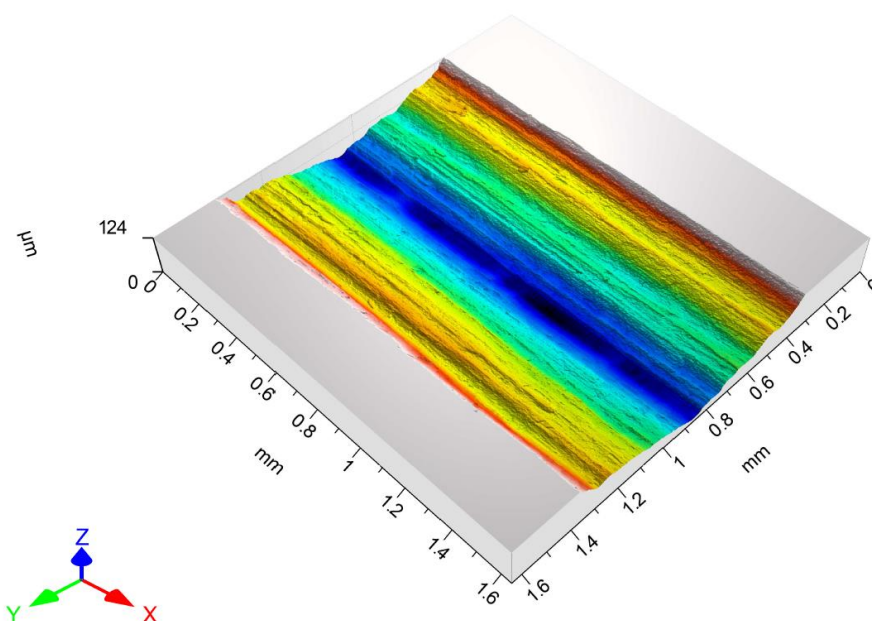
V grafu (obrázek 7.2.1) je zobrazena maximální hloubka prohlubně, po obvodu součásti, vynesena jako rozdíl od aritmetického průměru maximálních hloubek.

Maximální hloubka prohlubně - Karbid titanu



Obrázek 7.2.1 Graf průběhu maximální hloubky prohlubně – Karbid titanu

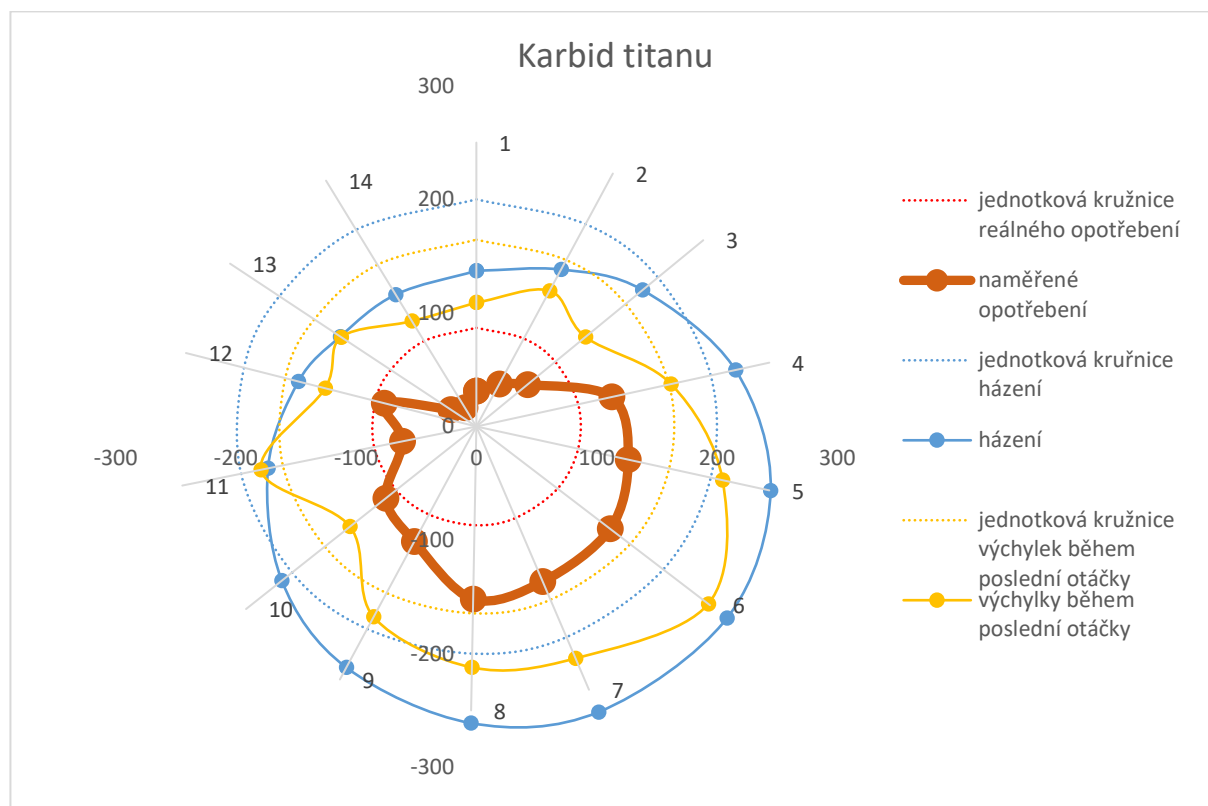
Z tohoto grafu je patrné, že průběh maximální hloubky prohlubně není konstantní po obvodu součásti. Maximální hloubka prohlubně se nachází v řezu 3, prohlubeň v tomto řezu je zobrazena na následujícím obrázku 7.2.2.



Obrázek 7.2.2 Prohlubeň - řez č.3, experiment s isoparafinem - Karbid titanu

Pro názornost byl graf na obrázku 7.2.1 doplněn o naměřené hodnoty výchylek snímače. Díky tomuto zobrazení (obrázek 7.2.3) lze lépe posoudit vliv přitlačné síly na konečné poškození měřené součásti. Jelikož přitlačná síla je funkcí výchylky snímače. Je patrné, že

největší vliv na průběh přitlačné síly má házení měřicí soustavy. V tomto případě lze konstatovat, že házení je jednoosé, které posunulo výsledky měření mimo střed jednotkové kružnice výchozího tvaru vzorku.

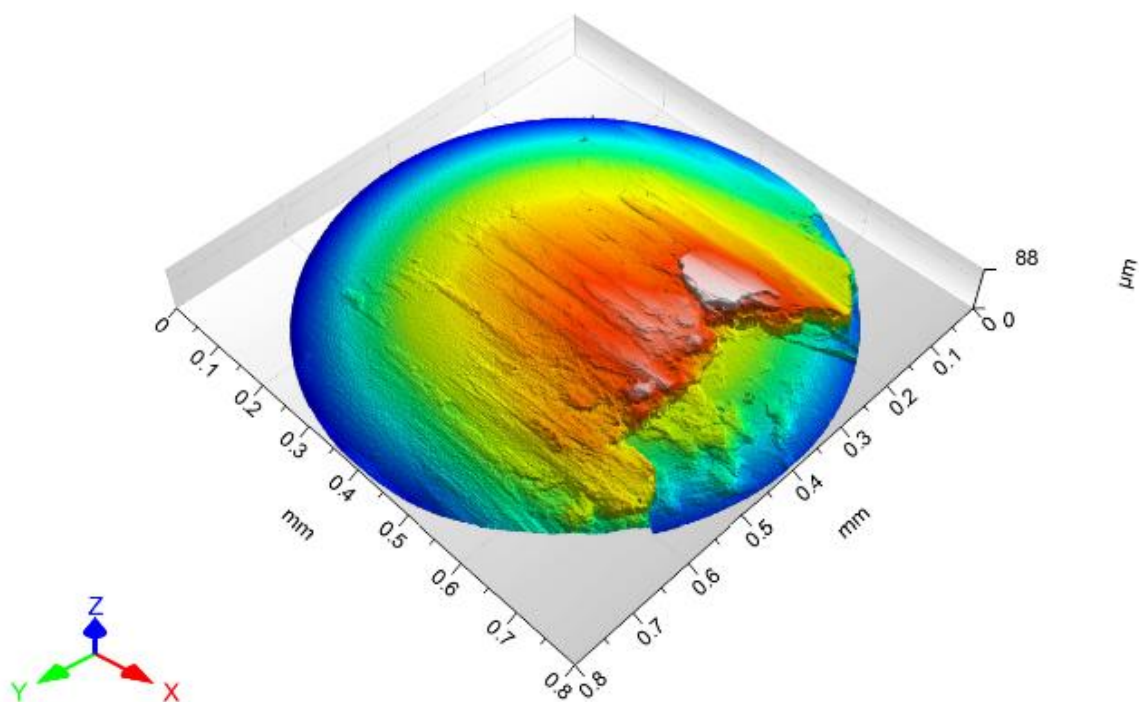


Obrázek 7.2.3 Poškození vzorku AL1, ošetření isoparafinem, měřicí dotek karbidu titanu

Na základě naměřených hodnot výchylek snímače na začátku a konci experimentu, by mělo být možné odhadnout skutečné opotřebení měřené součásti. Toto opotřebení by v ideálním případě mělo odpovídat výchylkám na konci experimentu. Ve skutečnosti je však tento odhad nepřesný, jelikož výsledné poškození součásti tvarově neodpovídá kruhovému profilu měřené součásti. Tudíž maximální prohlubeň textury povrchu není možné zaznamenat výchylkou snímače vlivem velkého poloměru kuličky měřicího doteku. Maximální opotřebení měřené součásti se nenachází v místě největší naměřené přitlačné síly. Předpokládá se, že opotřebení je ovlivněno nehomogenní strukturou materiálu. Jelikož v ideální případě se očekává, že naměřená maxima jednotlivých parametrů se budou nacházet v jednom řezu právě vlivem házení experimentálního zařízení.

Dalším důvodem posunu opotřebení od naměřených výchylek je nános materiálu na kuličce měřicího doteku viz. Obr. 7.2.4.

Na základě vyhodnocení opotřebení kuličky měřicího doteku bylo možné vypočítat objem tohoto nános, který činí $1\,613\,117\ \mu\text{m}^3$. Avšak důležitějším parametrem, při vyhodnocení poškození měřicího doteku, je maximální výška tohoto nános. Jelikož tato výška ovlivňuje přesnosti měření tohoto snímače. Maximální výška nános materiálu na kuličce karbidu titanu po provedení výše popsaného experimentu je $43,485\ \mu\text{m}$.



Obrázek 7.2.4 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z karbidu titanu

7.2.2 Nitrid křemíku

V tabulce 7.2.4 jsou uvedeny data opotřebení součásti měřicím dotekem z nitridu křemíku.

Tabulka 7.2.4 Hodnoty poškození vzorku AL1, ošetření isoparafinem, měřicí dotek nitridu křemíku

	F _p [N]	F _k [N]	Y _p [mm]	Z _{max} [μm]	Z _p [μm]	V _v [mm³/mm²]	
místo	1	1,468	1,464	1,0780	102,20	61,390	0,034546
	2	1,471	1,457	1,0959	116,42	71,163	0,044773
	3	1,475	1,466	1,0521	78,35	48,886	0,024746
	4	1,481	1,482	0,9873	70,52	27,629	0,012406
	5	1,486	1,478	1,0586	93,51	55,258	0,025235
	6	1,489	1,478	1,1364	107,75	69,062	0,038842
	7	1,489	1,479	1,0845	106,48	59,570	0,035418
	8	1,487	1,478	1,0699	97,51	57,511	0,034011
	9	1,484	1,476	1,0894	106,17	68,703	0,034546
	10	1,479	1,466	1,1202	113,77	67,356	0,042746
	11	1,474	1,462	1,1088	111,43	64,792	0,040264
	12	1,470	1,460	1,1186	116,78	71,285	0,030127
	13	1,468	1,455	1,1088	109,11	65,094	0,041571
	14	1,467	1,452	1,1283	127,71	78,133	0,049159
x _{max}	1,489		1,1364	127,710	78,133	0,049159	
x _{min}	1,452		0,9873	70,516	27,629	0,012406	
R	0,037		0,1492	57,194	50,504	0,036753	
x _{bar}	1,473		1,0883	104,122	61,845	0,034885	
s _x	0,010		0,0388	15,231	12,392	0,009518	

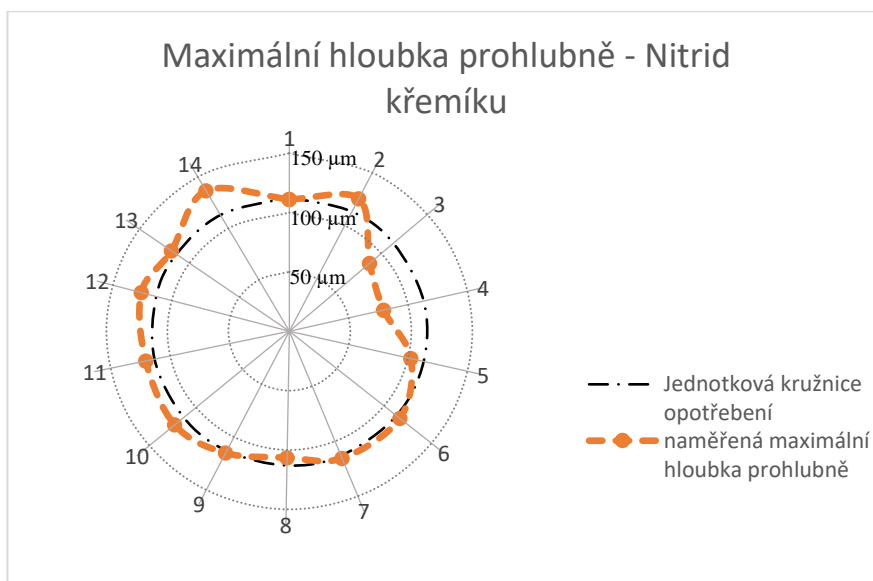
Během první otáčky měřené součásti byla největší naměřená síla v řezu číslo 7 a to $F_p = 1,489 \text{ N}$, největší síla během poslední otáčky byla naměřena také v řezu číslo 7 - $F_k = 1,479 \text{ N}$. Přítlačná síla se opět během experimentu nijak výrazně nezměnila. Průměrná přítlačná síla během tohoto experimentu byla $\bar{F} = 1,473 \text{ N}$, rozpětí $R_F = 0,037 \text{ N}$ a směrodatná odchylka $s_F = 0,010 \text{ N}$.

Největší naměřená šířka prohlubně průměrného profilu byla změřena v řezu číslo 6, kde $Y_p = 1,1364 \text{ mm}$, průměrná šířka prohlubně průměrného profilu $\bar{Y}_p = 1,0883 \text{ mm}$, rozpětí $R_{Y_p} = 0,1492 \text{ mm}$ a směrodatná odchylka $s_{Y_p} = 0,0388 \text{ mm}$.

Největší maximální hloubka prohlubně byla naměřena v řezu číslo 14 - $Z_{max} = 127,71 \mu\text{m}$, průměrná maximální hloubka byla $\bar{Z}_{max} = 104,122 \mu\text{m}$, rozpětí $R_{Z_{max}} = 57,194 \mu\text{m}$ a směrodatná odchylka $s_{Z_{max}} = 15,231 \mu\text{m}$.

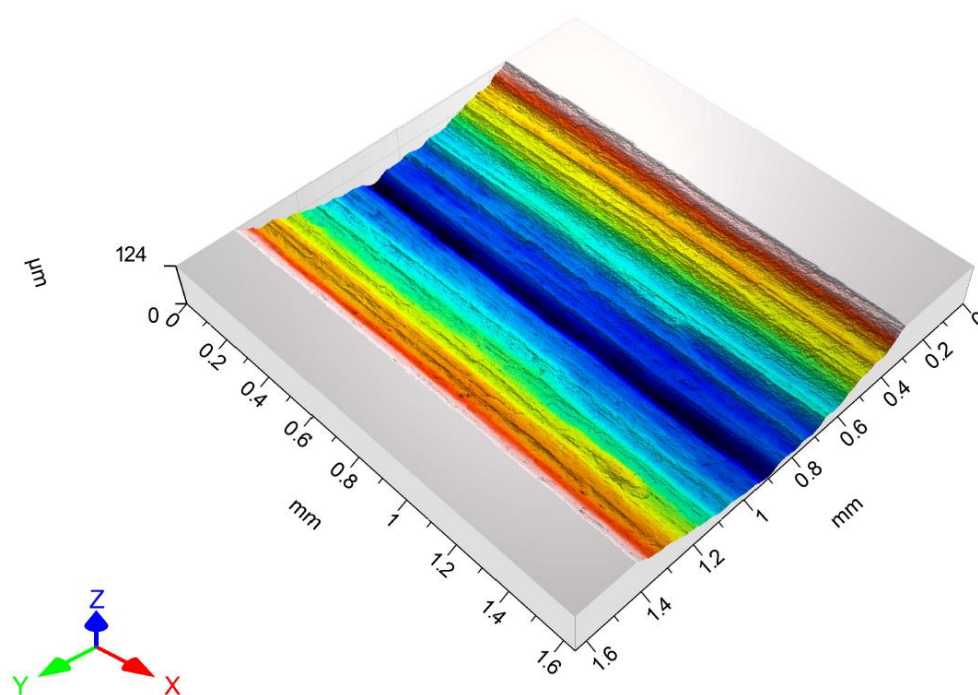
Největší naměřená hodnota prázdného objemu se nacházela také v 14. řezu a činila $V_V = 0,049159 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$, průměrná hodnota prázdného objemu pro danou prohlubeň byla $\bar{V}_V = 0,034885 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$, rozptyl $R_{V_V} = 0,036753 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$ a směrodatná odchylka $s_{V_V} = 0,009518 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$.

V následujícím grafu (obrázek 7.2.5) je zobrazena maximální hloubka prohlubně, po obvodu součásti, vynesena jako rozdíl od aritmetického průměru maximálních hloubek.



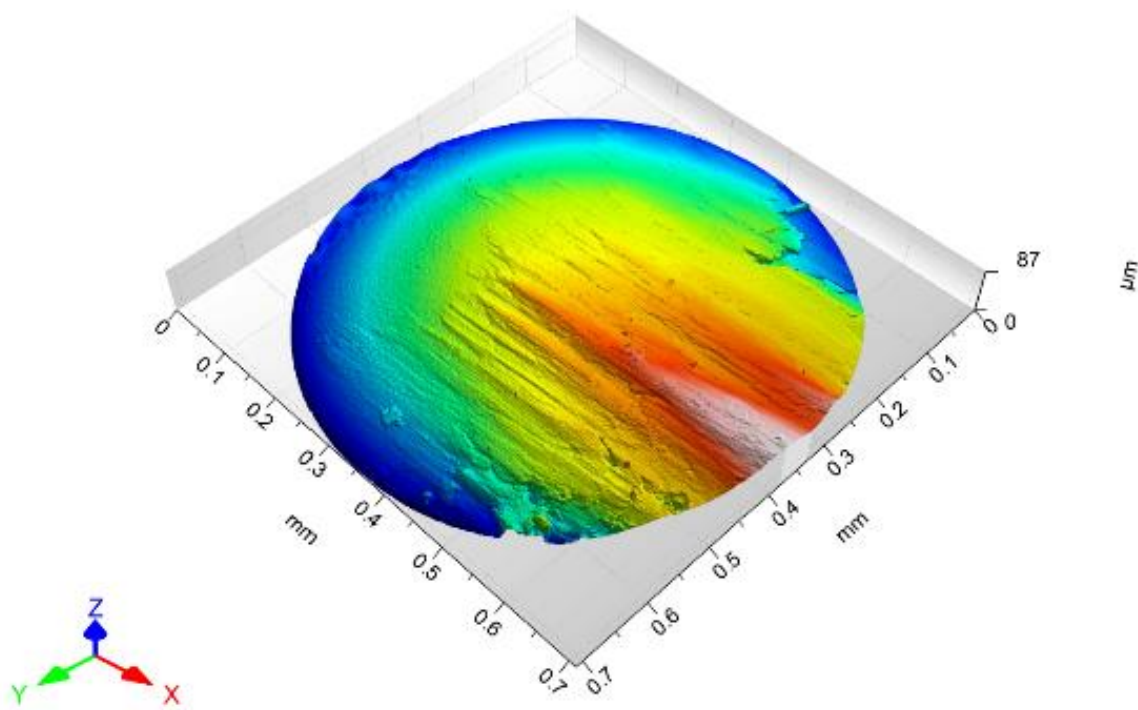
Obrázek 7.2.5 Graf průběhu maximální hloubky prohlubně – Nitrid křemíku

Z tohoto grafu je patrné, že průběh maximální hloubky prohlubně ani v případě doteku nitridu křemíku není konstantní. Maximální hloubka prohlubně se nachází v řezu 14, prohlubeň v tomto řezu je zobrazena na následujícím obrázku 7.2.6.



Obrázek 7.2.6 Prohlubeň - řez č.14, experiment s isoparafinem - Nitrid křemíku

Na základě vyhodnocení poškození kuličky měřicího doteku byl zjištěn nános materiálu na jejím povrchu. Objem nánosu na vrcholu kuličky (obr. 7.2.7) je přibližně $949\,955\ \mu\text{m}^3$ s maximální výškou $29,428\ \mu\text{m}$ nad úroveň původního vrcholu kuličky měřicího doteku. Avšak v tomto případě je výsledek zkreslen velkým množstvím nenásímaných bodů, což je způsobeno malým zvětšením zvoleného objektivu a velké křivosti koule.



Obrázek 7.2.7 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z nitridu křemíku

7.2.3 Zirkonium

V tabulce 7.2.5 jsou uvedeny data opotřebení součásti měřicím dotekem ze zirkonia.

Tabulka 7.2.5 Hodnoty poškození vzorku AL1, ošetření isoparafinem, měřicí dotek zirkonia

		F _p [N]	F _k [N]	Y _p [mm]	Z _{max} [μm]	Z _p [μm]	V _v [mm³/mm²]
místo	1	1,470	1,462	1,0326	100,450	64,452	0,033906
	2	1,473	1,467	1,0326	98,857	62,793	0,033391
	3	1,478	1,472	1,1088	105,640	61,249	0,038232
	4	1,483	1,475	1,0456	103,640	63,118	0,037699
	5	1,488	1,476	1,0845	115,400	76,93	0,043849
	6	1,491	1,485	0,85108	106,100	44,446	0,015430
	7	1,491	1,488	1,0813	93,800	52,705	0,027342
	8	1,490	1,481	1,0845	99,434	60,909	0,035634
	9	1,487	1,477	1,0618	97,412	61,164	0,024556
	10	1,483	1,471	1,1105	106,390	64,049	0,040263
	11	1,477	1,467	1,1169	102,960	65,076	0,037198
	12	1,473	1,462	1,1169	112,070	65,128	0,040241
	13	1,471	1,462	1,0845	96,189	60,377	0,036849
	14	1,470	1,462	1,0797	101,690	59,517	0,035910
x _{max}	1,491		1,1169	115,400	76,930	0,043849	
x _{min}	1,462		0,8511	93,800	44,446	0,015430	
R	0,030		0,2658	21,600	32,484	0,028419	
x _{bar}	1,476		1,0637	102,859	61,565	0,034321	
s _x	0,009		0,0675	5,978	7,111	0,007384	

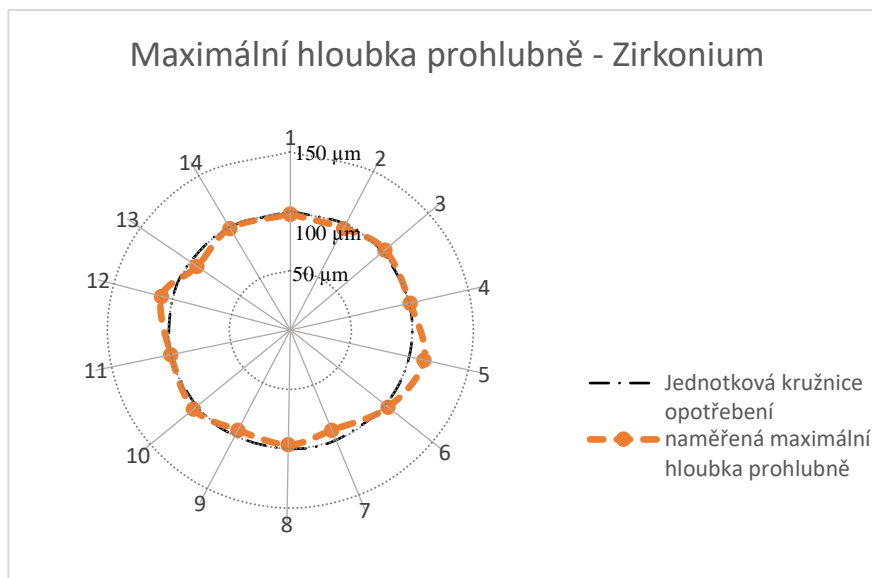
Během první otáčky měřené součásti byla největší naměřená síla v řezu číslo 7 a to $F_p = 1,491 \text{ N}$, největší síla během poslední otáčky byla také v řezu číslo 7 - $F_k = 1,488 \text{ N}$. Přítlačná síla se během experimentu nijak výrazně nezměnila. Průměrná přítlačná síla během experimentu byla $\bar{F} = 1,476 \text{ N}$, rozpětí $R_F = 0,030 \text{ N}$, směrodatná odchylka $s_F = 0,009 \text{ N}$.

Největší naměřená šířka prohlubně průměrného profilu způsobená měřicím dotekem byla změřena v řezích 11 a 12, kde $Y_p = 1,1169 \text{ mm}$. Na základě naměřených dat byla průměrná šířka prohlubně průměrného profilu $\bar{Y}_p = 1,0637 \text{ mm}$, rozpětí $R_{Y_p} = 0,2658 \text{ mm}$ a směrodatná odchylka $s_{Y_p} = 0,0675 \text{ mm}$.

Největší maximální hloubka prohlubně byla naměřena v řezu číslo 5, ve kterém $Z_{max} = 115,400 \mu\text{m}$, průměrná maximální hloubka byla $\bar{Z}_{max} = 102,859 \mu\text{m}$, rozpětí $R_{Z_{max}} = 21,600 \mu\text{m}$ a směrodatná odchylkou $s_{Z_{max}} = 5,978 \mu\text{m}$. Stejným způsobem byla vyhodnocena i průměrná hloubka prohlubně Z_p jejíž maximum se rovněž nacházelo v řezu číslo 5.

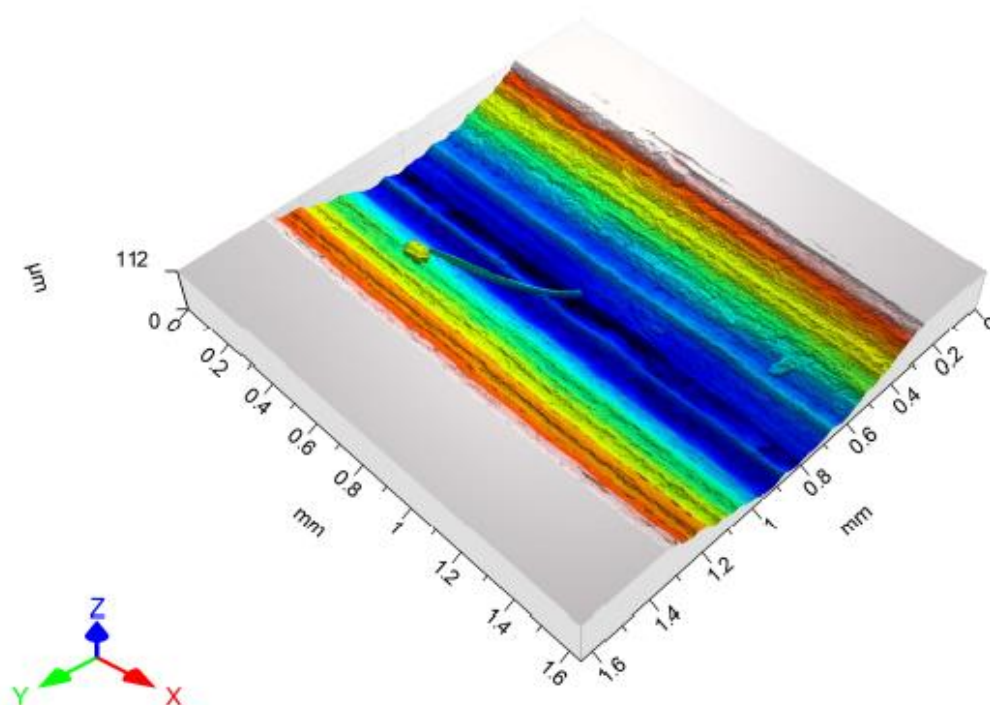
Největší naměřená hodnota prázdného objemu se nacházela také v 5. řezu - $V_v = 0,043849 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$, průměrná hodnota prázdného objemu pro danou prohlubeň byla $\bar{V}_v = 0,034321 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$, rozpětí bylo $R_{V_v} = 0,028419 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$ a směrodatná odchylka $s_{V_v} = 0,007384 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$.

V následujícím grafu (obrázek 7.2.8) je zobrazena maximální hloubka prohlubně, po obvodu součásti, vynesena jako rozdíl od aritmetického průměru maximálních hloubek pro měřicí dotek ze zirkonia.



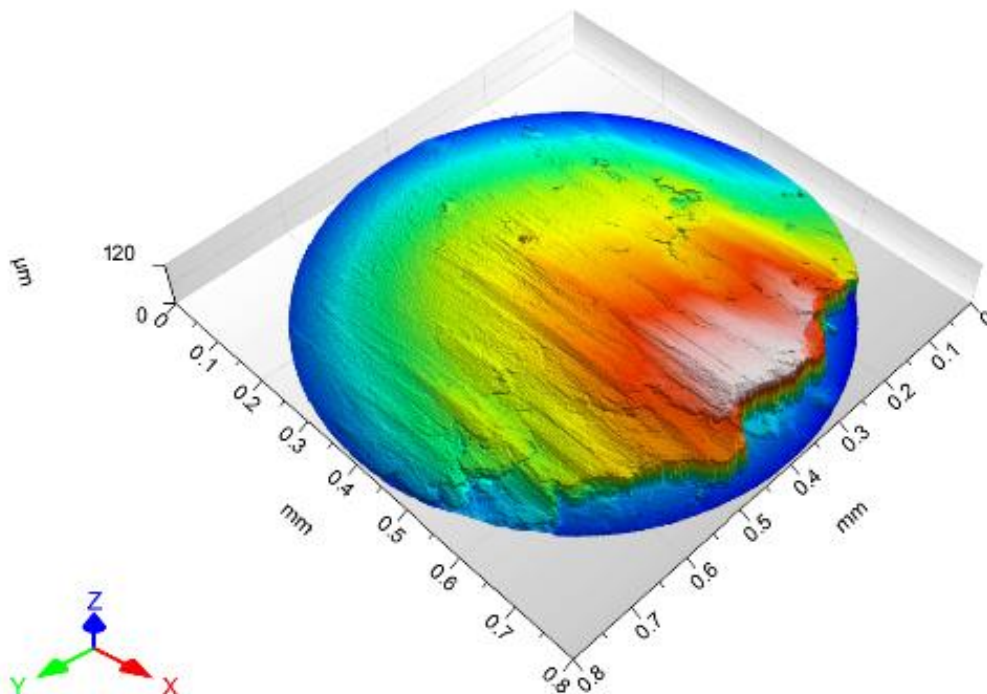
Obrázek 7.2.8 Graf průběhu maximální hloubky prohlubně – Zirkonium

Průběh maximální hloubky prohlubně po obvodu měřené součásti není konstantní. Maximální hloubka prohlubně se nachází v řezu 5, prohlubeň v tomto řezu je zobrazena na následujícím obrázku 7.2.9.



Obrázek 7.2.9 Prohlubeň - řez č.5, experiment s isoparafinem - Zirkonium

Na základě vyhodnocení poškození kuličky měřicího doteku byl zjištěn nános materiálu na jejím povrchu. Objem nánosů na vrcholu kuličky (obr. 7.2.10) je přibližně $5\,513\,012\ \mu\text{m}^3$ s maximální výškou $85,322\ \mu\text{m}$ nad úroveň původního vrcholu kuličky měřicího doteku.



Obrázek 7.2.10 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku ze zirkonia

7.2.4 Ložisková ocel

V tabulce 7.2.6 jsou uvedeny data opotřebení součásti měřicím dotekem z ložiskové oceli 14109.

Tabulka 7.2.6 Hodnoty poškození vzorku AL1, ošetření isoparafinem, měřicí dotek ložiskové oceli

		F _p [N]	F _k [N]	Y _p [mm]	Z _{max} [μm]	Z _p [μm]	V _v [mm³/mm²]
místo	1	1,468	1,460	1,1931	116,44	71,522	0,044953
	2	1,470	1,467	1,0424	83,96	51,714	0,021188
	3	1,475	1,461	1,1348	100,72	59,976	0,035381
	4	1,480	1,469	1,1234	117,83	72,609	0,043519
	5	1,485	1,473	1,1623	114,11	73,628	0,049460
	6	1,488	1,476	1,1445	116,00	79,841	0,044518
	7	1,488	1,483	1,0991	87,49	59,484	0,035733
	8	1,486	1,473	1,1088	139,90	70,271	0,040115
	9	1,483	1,471	1,1899	128,55	87,847	0,055452
	10	1,480	1,467	1,1591	118,21	79,845	0,050396
	11	1,474	1,462	1,1656	120,09	76,153	0,050182
	12	1,470	1,473	1,1510	115,65	74,689	0,044947
	13	1,468	1,461	1,1494	107,93	70,841	0,035947
	14	1,467	1,455	1,1396	105,37	72,82	0,044964
x _{max}	1,488		1,1931	139,90	87,847	0,055452	
x _{min}	1,455		1,0424	83,96	51,714	0,021188	
R	0,033		0,1507	55,94	36,133	0,034264	
x _{bar}	1,473		1,1402	112,30	71,517	0,042625	
s _x	0,009		0,0388	14,72	9,267	0,008593	

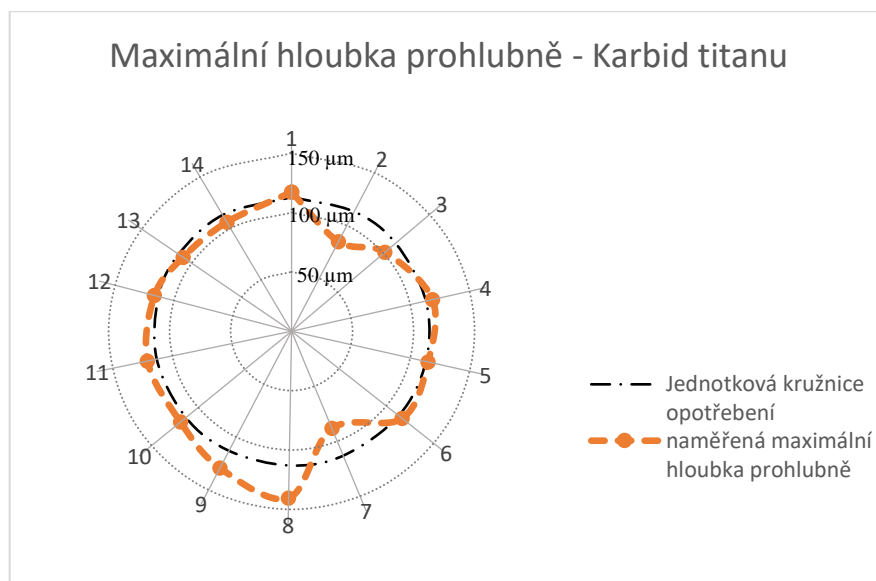
Během první otáčky měřené součásti byla největší naměřená síla v řezu číslo 6 - $F_p = 1,488 \text{ N}$, největší síla během poslední otáčky byla také v řezu číslo 7 - $F_k = 1,483 \text{ N}$. Přítlačná síla se opět během experimentu nijak výrazně nezměnila. Průměrná přítlačná síla během tohoto experimentu byla $\bar{F} = 1,473 \text{ N}$ s rozpětím $R_F = 0,033 \text{ N}$ a směrodatnou odchylkou $s_F = 0,009 \text{ N}$.

Největší naměřená šířka prohlubně průměrného profilu způsobená měřicím dotykem byla změřena v řezu 1, kde $Y_p = 1,1931 \text{ mm}$, průměrná šířka prohlubně průměrného profilu $\bar{Y}_p = 1,1402 \text{ mm}$, s rozpětím $R_{Y_p} = 0,107 \text{ mm}$ a směrodatnou odchylkou $s_{Y_p} = 0,0388 \text{ mm}$.

Největší maximální hloubka prohlubně byla naměřena v řezu číslo 8, ve kterém $Z_{max} = 139,9 \mu\text{m}$, průměrná maximální hloubka byla $\bar{Z}_{max} = 112,30 \mu\text{m}$, rozpětí $R_{Z_{max}} = 55,94 \mu\text{m}$ a směrodatná odchylka $s_{Z_{max}} = 14,720 \mu\text{m}$.

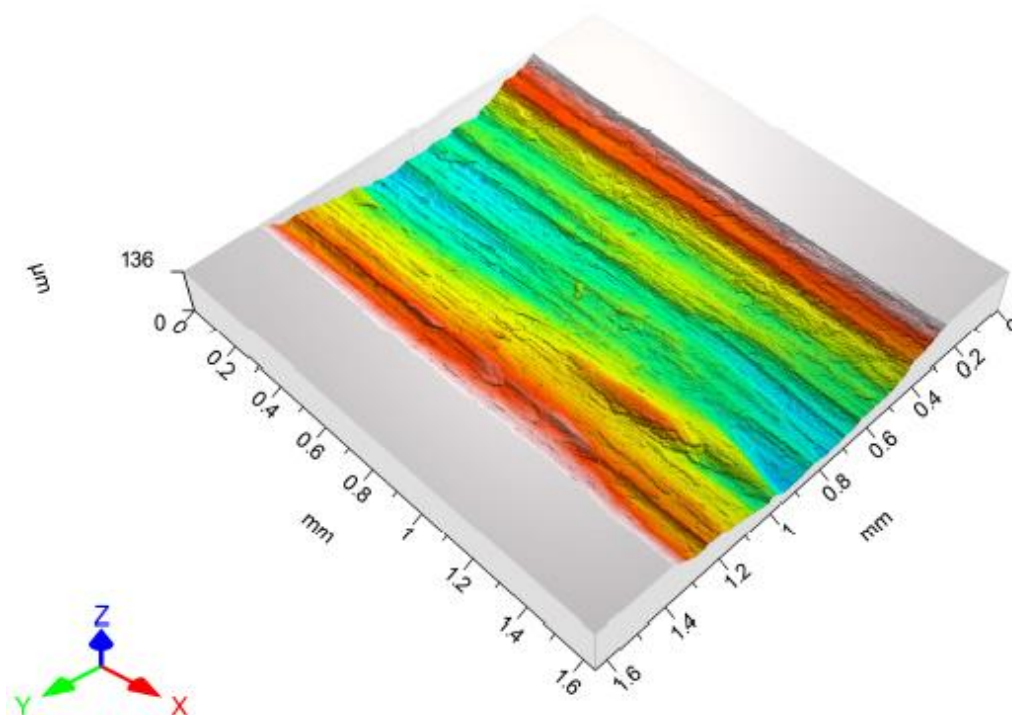
Největší naměřená hodnota prázdného objemu se nacházela v 9. řezu - $V_V = 0,055452 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$. Průměrná hodnota prázdného objemu pro danou prohlubeň je $\bar{V}_V = 0,034264 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$, rozpětí hodnot bylo $R_{V_V} = 0,034264 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$ a směrodatná odchylka $s_{V_V} = 0,008593 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$.

V následujícím grafu (obrázek 7.2.11) je zobrazena maximální hloubka prohlubně, po obvodu součásti, vynesena jako rozdíl od aritmetického průměru maximálních hloubek.



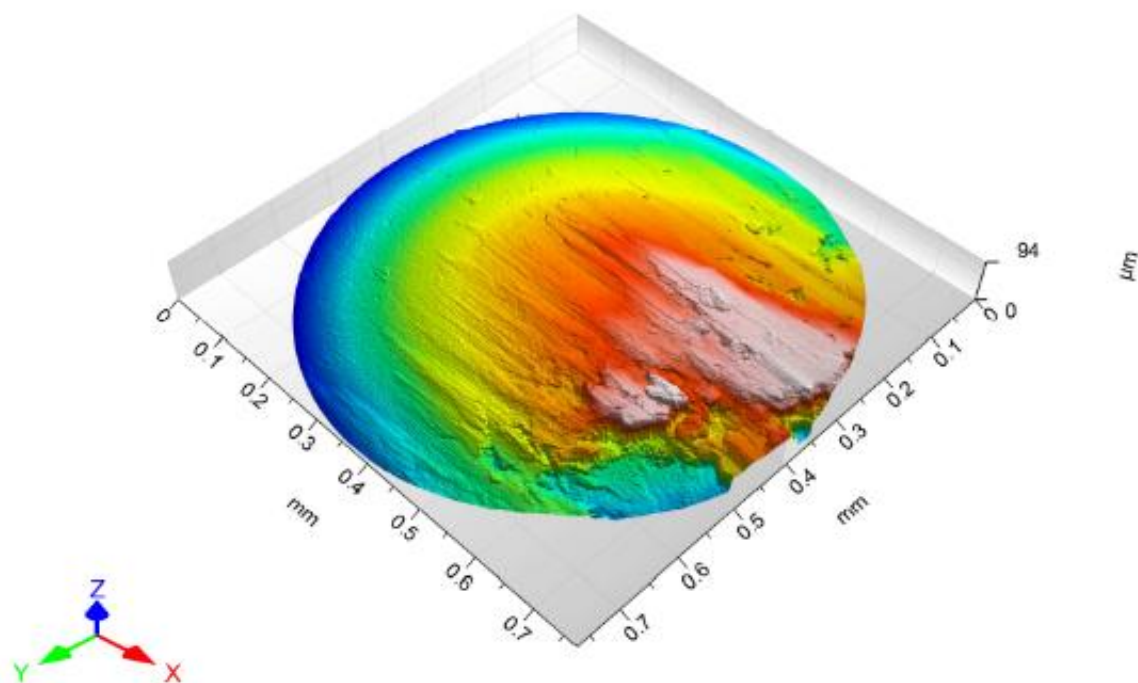
Obrázek 7.2.11 Graf průběhu maximální hloubky prohlubně – ložisková ocel

Z tohoto grafu je patrné, že průběh maximální hloubky prohlubně není konstantní. Maximální hloubka prohlubně se nachází v řezu 8, prohlubeň v tomto řezu je zobrazena na následujícím obrázku 7.2.12.



Obrázek 7.2.12 Prohlubeň - řez č.8, experiment s isoparafinem – ložisková ocel

Opět byl zjištěn nános materiálu na povrchu kuličky měřicího doteku. Objem nánosu na vrcholu kuličky (obr. 7.2.13) je přibližně $671\,754\,\mu\text{m}^3$ s maximální výškou $51,002\,\mu\text{m}$ nad úroveň původního vrcholu kuličky měřicího doteku.



Obrázek 7.2.13 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z ložiskové oceli

7.2.5 Rubín

V tabulce 7.2.7 jsou uvedeny data opotřebení součásti měřicím dotekem z rubínu.

Tabulka 7.2.7 Hodnoty poškození vzorku ALI, ošetření isoparafinem, měřicí dotek rubínu

	Fp [N]	Fk[N]	Y _p [mm]	Z _{max} [μm]	Z _p [μm]	Vv [mm³/mm²]	
místo	1	1,466	1,466	1,1267	139,61	88,299	0,042212
	2	1,469	1,466	1,0132	97,179	52,739	0,022998
	3	1,473	1,463	1,0245	103,06	56,856	0,024659
	4	1,478	1,467	1,1396	133,93	74,476	0,044462
	5	1,483	1,477	1,0926	123,25	70,572	0,040481
	6	1,487	1,489	1,0002	99,202	48,438	0,016978
	7	1,487	1,474	1,1056	127,44	73,949	0,045705
	8	1,486	1,479	1,1121	100,64	59,288	0,032181
	9	1,483	1,483	1,0553	87,918	60,259	0,01994
	10	1,479	1,465	1,1186	132,76	75,776	0,045613
	11	1,474	1,458	1,1364	139,81	76,869	0,050022
	12	1,470	1,456	1,1639	138,85	89,328	0,042013
	13	1,468	1,464	1,1348	133,36	78,507	0,046897
	14	1,467	1,455	1,0861	100,29	53,974	0,028852
x _{max}	1,489		1,1639	139,810	89,328	0,050022	
x _{min}	1,455		1,0002	87,918	48,438	0,016978	
R	0,034		0,1637	51,892	40,890	0,033044	
xbar	1,473		1,0935	118,379	68,524	0,035930	
s _x	0,010		0,0514	19,074	13,211	0,011271	

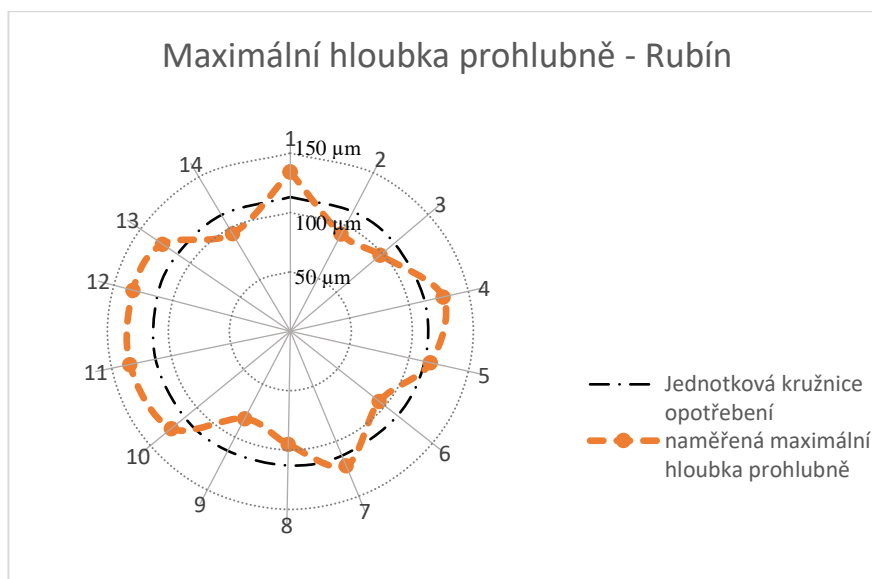
Během první otáčky měřené součásti byla největší naměřená síla v řezu číslo 6, $F_p = 1,487 \text{ N}$, největší síla během poslední otáčky byla také v řezu číslo 6, $F_k = 1,489 \text{ N}$. Přítlačná síla se ani v tomto případě během experimentu výrazně nezměnila. Průměrná přítlačná síla během tohoto experimentu byla $\bar{F} = 1,473 \text{ N}$, s rozpětí $R_F = 0,034 \text{ N}$ a směrodatná odchylka $s_F = 0,010 \text{ N}$.

Největší naměřená šířka prohlubně průměrného profilu způsobená měřicím dotekem naměřena v řezu 12, kde $Y_p = 1,1639 \text{ mm}$, byla průměrná šířka prohlubně průměrného profilu $\bar{Y}_p = 1,0935 \text{ mm}$, rozpětí $R_{Y_p} = 0,1637 \text{ mm}$ a směrodatná odchylka $s_{Y_p} = 0,0514 \text{ mm}$.

Největší maximální hloubka prohlubně byla naměřena v řezu číslo 11, ve kterém $Z_{max} = 139,81 \mu\text{m}$, průměrná maximální hloubka $\bar{Z}_{max} = 118,379 \mu\text{m}$, rozpětí $R_{Z_{max}} = 51,892 \mu\text{m}$ a směrodatná odchylka $s_{Z_{max}} = 19,074 \mu\text{m}$.

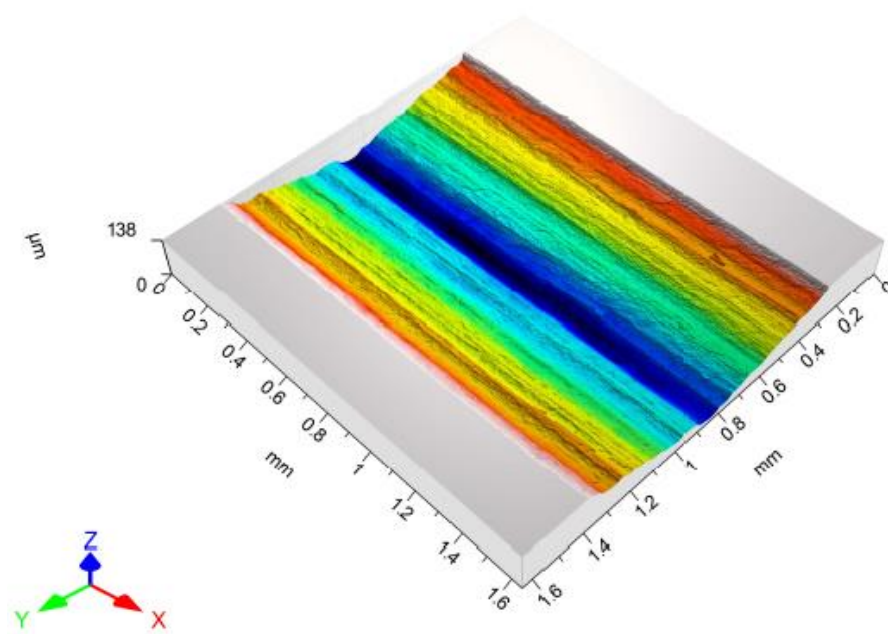
Největší naměřená hodnota prázdného objemu se nacházela v 11. řezu, $V_V = 0,050022 \frac{mm^3}{mm^2}$, průměrná hodnota prázdného objemu $\bar{V}_V = 0,035930 \frac{mm^3}{mm^2}$, rozpětí $R_{V_V} = 0,033044 \frac{mm^3}{mm^2}$ a směrodatná odchylka $s_{V_V} = 0,011271 \frac{mm^3}{mm^2}$.

V následujícím grafu (obrázek 7.2.14) je zobrazena maximální hloubka prohlubně, po obvodu součásti, vynesena jako rozdíl od aritmetického průměru maximálních hloubek.



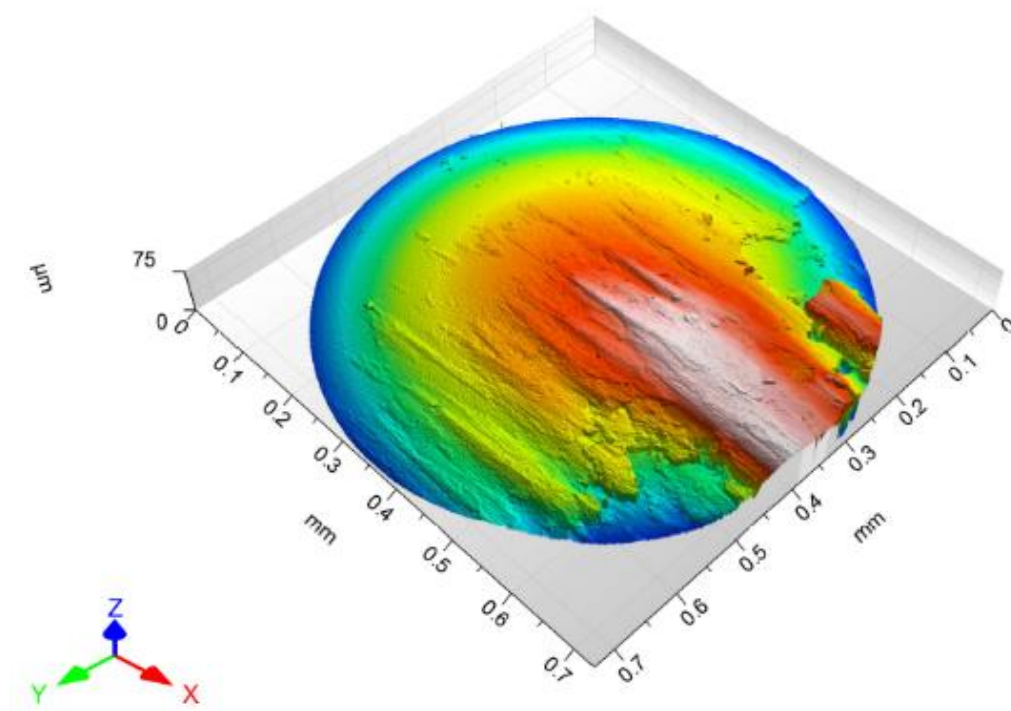
Obrázek 7.2.14 Graf průběhu maximální hloubky prohlubně – Rubín

Z grafu je patrné, že průběh maximální hloubky prohlubně není konstantní. Maximální hloubka prohlubně se nachází v řezu 11, prohlubeň v tomto řezu je zobrazena na následujícím obrázku 7.2.15. Avšak oproti předchozím materiálům měřicím doteků lze sledovat větší rozdíly mezi velikostmi maximálních prohlubní v jednotlivých řezech.



Obrázek 7.2.15 Prohlubeň - řez č.11, experiment s isoparafínem - Rubín

Na základě vyhodnocení poškození kuličky měřicího doteku byl zjištěn nános materiálu na jejím povrchu. Objem nánosů na vrcholu kuličky (obr. 7.2.16) je přibližně $295\,285\ \mu\text{m}^3$ s maximální výškou $46,382\ \mu\text{m}$ nad úroveň původního vrcholu kuličky měřicího doteku.



Obrázek 7.2.16 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z rubínu

7.2.6 TUL č.1

V tabulce 7.2.8 jsou uvedena data opotřebení součásti měřicím dotekem z kompozitního materiálu TUL č.1.

Tabulka 7.2.8 Hodnoty poškození vzorku AL1, ošetření isoparafinem, měřicí dotek TUL č.1

	F _p [N]	F _k [N]	Y _p [mm]	Z _{max} [μm]	Z _p [μm]	V _v [mm³/mm²]	
misto	1	1,469	1,426	1,399	24,248	5,4151	0,0033786
	2	1,471	1,428	1,4476	26,729	5,1635	0,0032365
	3	1,475	1,432	1,4249	23,426	4,8078	0,002843
	4	1,481	1,437	1,2985	24,952	6,1641	0,0038482
	5	1,485	1,442	1,4476	26,513	7,0635	0,0047661
	6	1,488	1,445	1,2872	30,544	5,0654	0,0030322
	7	1,488	1,446	1,1461	34,891	3,5503	0,0017832
	8	1,487	1,444	1,1591	19,003	3,1447	0,0015682
	9	1,484	1,441	1,2029	22,416	1,8221	0,00095579
	10	1,480	1,438	1,305	19,873	3,533	0,0021101
	11	1,475	1,433	1,2807	22,048	4,5235	0,0028751
	12	1,472	1,429	1,4428	24,111	5,1943	0,0037263
	13	1,469	1,426	1,3066	31,055	5,5161	0,0034246
	14	1,468	1,426	1,3034	24,563	6,2761	0,0037593
x _{max}	1,488		1,4476	34,891	7,064	0,004766	
x _{min}	1,426		1,1461	19,003	1,822	0,000956	
R	0,063		0,3015	15,888	5,241	0,003810	
x _{bar}	1,457		1,3180	25,312	4,803	0,002951	
s _x	0,023		0,1032	4,392	1,394	0,001031	

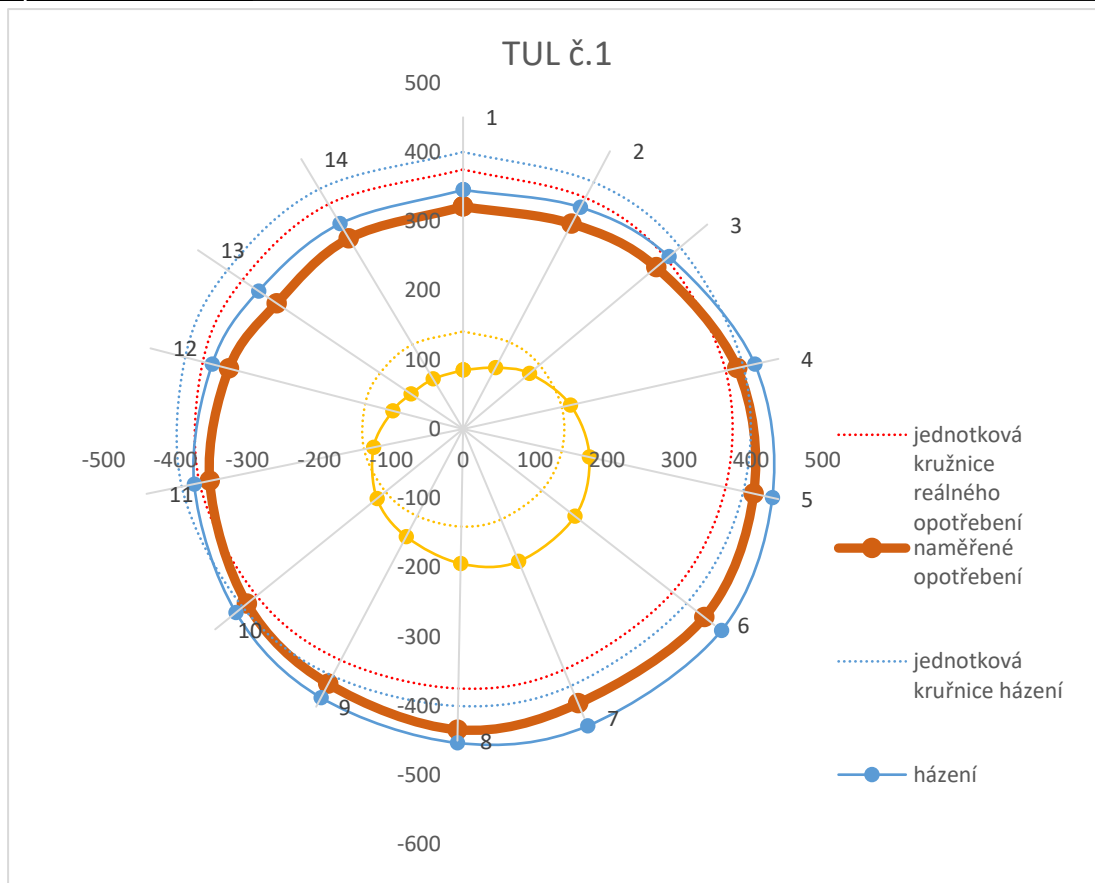
Během první otáčky měřené součásti byla největší naměřená síla v řezu číslo 7 $F_p = 1,488 \text{ N}$, největší síla během poslední otáčky byla také v řezu číslo 7 $F_k = 1,446 \text{ N}$. Bylo možné tedy sledovat největší změnu přítlačné síly v průběhu tohoto experimentu. Průměrná přítlačná síla během tohoto experimentu byla $\bar{F} = 1,457 \text{ N}$, s rozpět $R_F = 0,063 \text{ N}$ a směrodatná odchylka $s_F = 0,023 \text{ N}$.

Největší naměřená šířka prohlubně průměrného profilu způsobená měřicím dotykem byla změřena v řezu číslo 5 $Y_p = 1,4476 \text{ mm}$, průměrná šířka prohlubně průměrného profilu $\bar{Y}_p = 1,3180 \text{ mm}$, rozpětí $R_{Y_p} = 0,3015 \text{ mm}$ a směrodatná odchylka $s_{Y_p} = 0,1032 \text{ mm}$.

Největší maximální hloubka prohlubně byla naměřena v řezu číslo 7 $Z_{max} = 34,891 \mu\text{m}$, průměrná maximální hloubka $\bar{Z}_{max} = 25,312 \mu\text{m}$, rozpětí $R_{Z_{max}} = 15,888 \mu\text{m}$ a směrodatná odchylka $s_{Z_{max}} = 4,392 \mu\text{m}$.

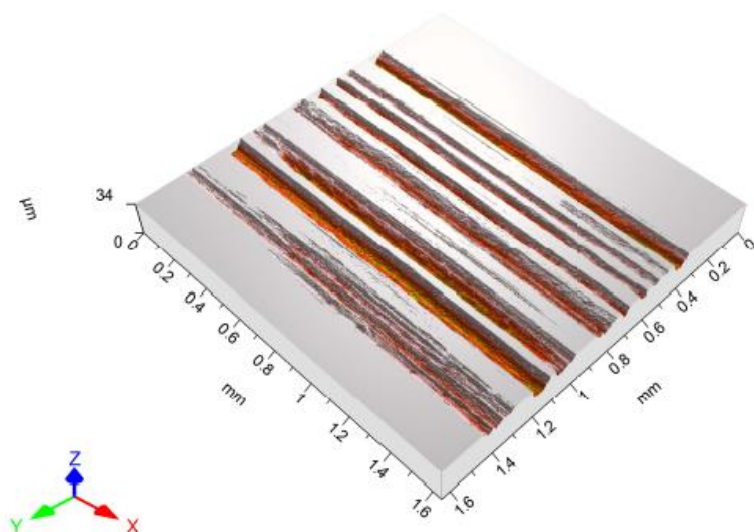
Největší naměřená hodnota prázdného objemu se nacházela v 5. řezu $V_V = 0,0047661 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$, průměrná hodnota prázdného objemu $\bar{V}_V = 0,002951 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$, rozptyl $R_{V_V} = 0,003810 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$ a směrodatná odchylka $s_{V_V} = 0,001031 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2}$.

Hodnoty výchylek snímače a maximální hloubky prohlubně obsažené v tabulce 7.2.8 graficky znázorněna v obrázku 7.2.17. Na základě, čeho lze posoudit vliv přítlačné síly na konečné poškození měřené součásti. Je patrné, že největší vliv na přítlačnou sílu má házení měřicí soustavy. V tomto případě lze vidět jednoosé házení, které posunulo výsledky mimo střed jednotkové kružnice výchozího tvaru vzorku.



Obrázek 7.2.17 Poškození vzorku AL1, ošetření isoparafinem, měřicí dotek TUL č.1

Na základě předchozích dat se dá dojít k milnému závěru, že měřicí dotek z TUL č.1 je vhodný pro měření součástí vyrobených ze siluminu. Jelikož je v tomto případě měřeno jedno z nejmenších opotřebení na měřené součásti, která byla během tohoto experimentu naměřena. Zároveň naměřené opotřebení se chová podle předpokladu, tudíž že je konstantní po obvodu měřené součásti. Maximální hloubka opotřebení byla naměřena v řezu číslo 7, tato prohlubeň je vyobrazena na obrázku 7.2.18.

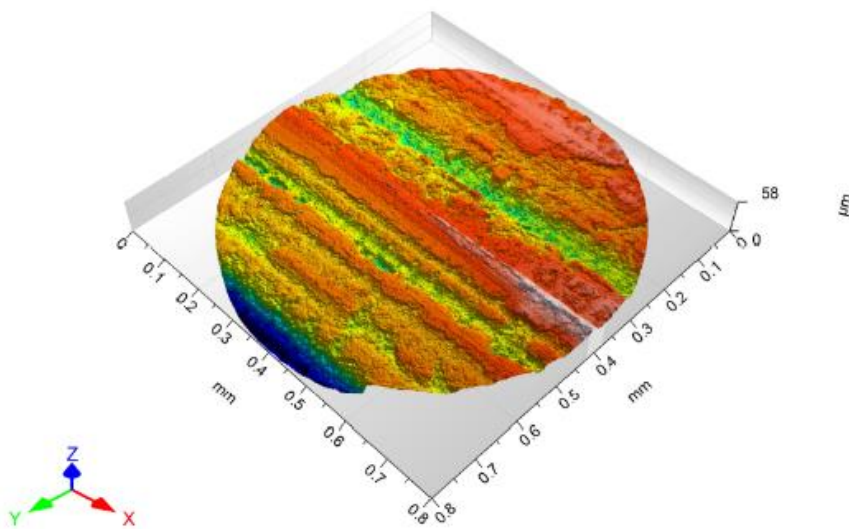


Obrázek 7.2.18 Prohlubeň - řez č.7, experiment s isoparafinem – TUL č.1

Z předchozího obrázku je zřejmé, že u doteku z TUL č.1 se nejedná o jednu celistvou prohlubeň jako v případě prohlubní způsobených ostatními materiály měřicích doteků. Poškození povrchu součásti tímto měřicím dotekem je tvořeno soustavou menších prohlubní.

Nasnímáním kuličky měřicího doteku bylo zjištěno, že povrch doteku byl odbroušen do roviny viz obr. 7.2.19. Díky tomuto zjištění je možné říci, že dotek vyrobený z kompozitního materiálu TUL č.1 je nevhodný pro dynamické metody měření.

Tento materiál by mohl být vhodný pro výkmitové metody měření, jelikož je možné lehce získat funkci otěru pro tento materiál. Avšak tento předpoklad je nutné experimentálně ověřit.



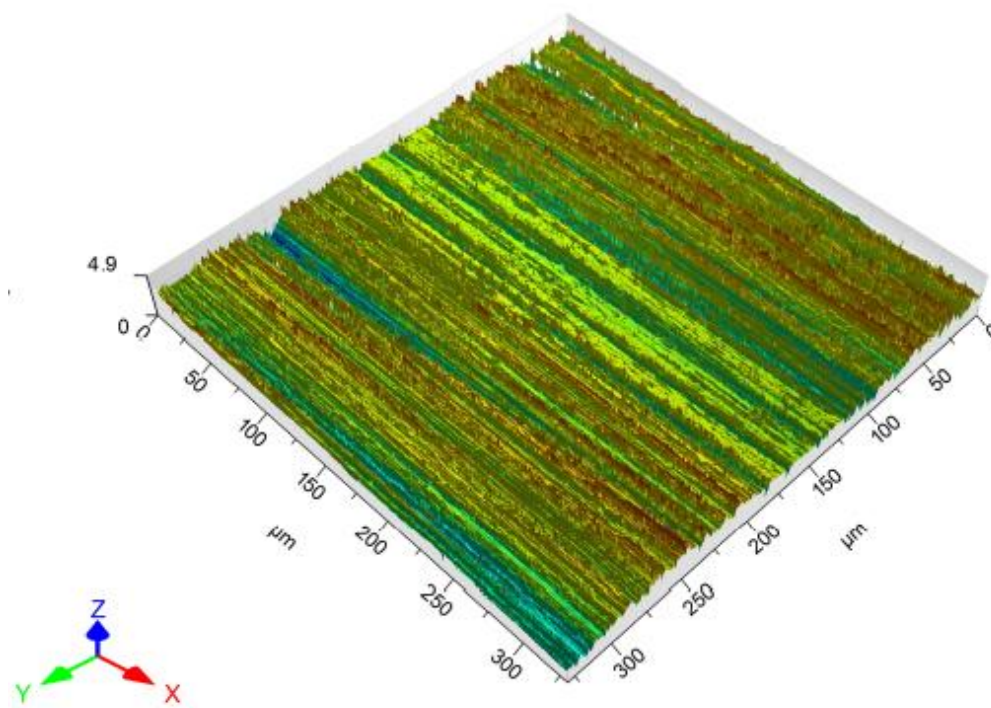
Obrázek 7.2.19 Obroušená kulička TUL č.1

Na základě vyhodnocení bylo zjištěno, že objem obroušeného na vrcholku kuličky je přibližně $14\,282\,807\,\mu\text{m}^3$ a výška chybějící kulové úseče je $70,172\,\mu\text{m}$. Objem odbroušeného materiálu odpovídá přibližně jednomu procentu celkového objemu kuličky měřicího doteku.

7.2.7 Diamant

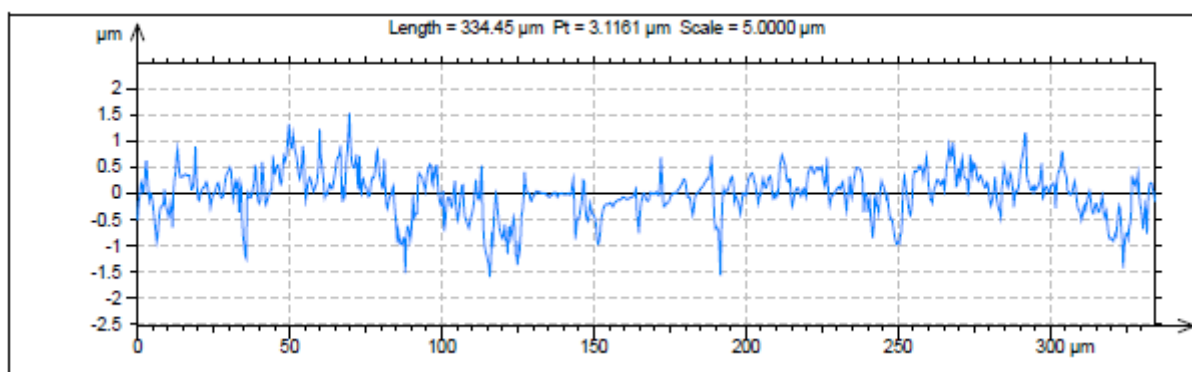
Během vyhodnocování experimentu nebylo možné změřit poškození povrchu součásti měřicím dotekem z nanokrystalického diamantu. V případě tohoto materiálu by bylo nutné nasnímat celý povrch měřené součásti před samotným experimentem, nebo vyhodnotit toto poškození na jiném zařízení, než je právě na CCI.

Změny textury povrchu jsou velmi malé a není možné je jasně odlišit od výchozí textury povrchu. I přes fakt, že dráha měřicího doteku je viditelná pouhým okem viz. obrázek 7.2.20.



Obrázek 7.2.20 Dráha měřicího doteku z nanokrystalického diamantu

Změna textury povrchu, která je pozorovatelná, nikoliv však měřitelná, je lokální zlepšení parametrů textury povrchu. To lze vysvětlit jako přesun materiálu výstupků textury povrchu do míst prohlubní textury povrchu. Tudiž tento jev se projevuje jako zaleštění povrchu měřené součásti, popisovaný jev lze sledovat na obr. 7.2.21. Tento obrázek představuje profil nasnímané textury povrchu měřené součásti. Zaleštění, které je popsáno výše, lze na tomto profilu sledovat na y ose mezi hodnotami 100μm až 200μm.



Obrázek 7.2.21 Profil textury povrchu součásti měřený měřicím dotekem z nanokrystalického diamantu

Změny povrchu nejsou měřitelné ani na kuličce měřicího doteku z nanokrystalického diamantu.

Jelikož nebylo naměřeno žádné poškození kuličky měřicího doteku ani měřené součásti, tak se doporučuje tento materiál jako nejvhodnější pro použití v praxi za podmínek tohoto experimentu.

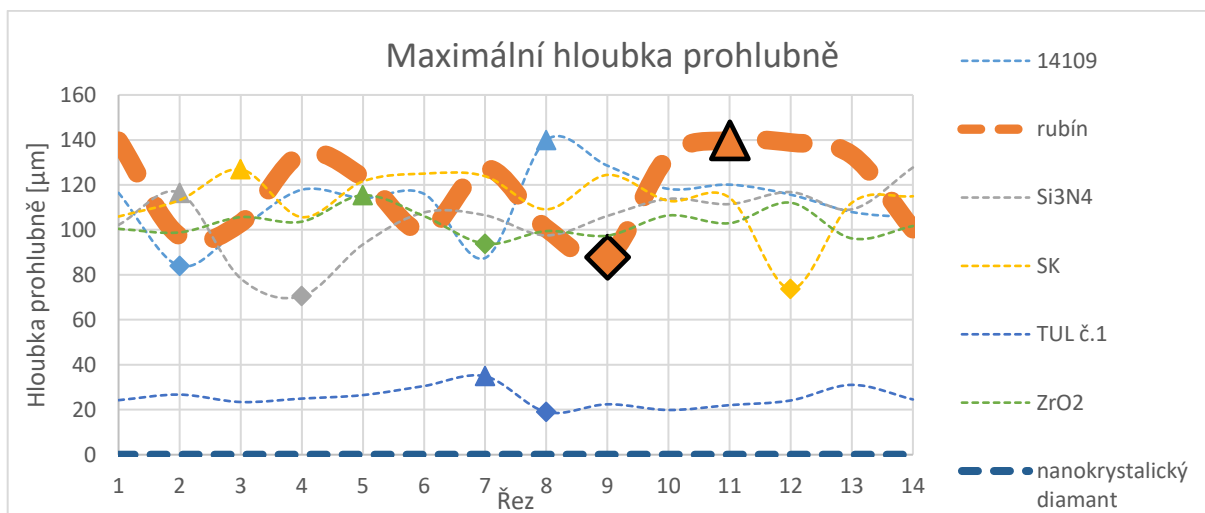
7.2.8 Vyhodnocení experimentu s ISOPARAFINEM

Výsledky měření poškození měřené součásti a měřicího doteku, jsou dále porovnávány s poškozením vyvolaným kuličkou z rubínu. Jelikož rubín je v průmyslu nejpoužívanějším materiálem kuliček měřicích doteků ve strojírenské metrologii.

Tabulka 7.2.9 Maximální hloubka prohlubně, experiment s ISOPARAFINEM, porovnání

	maximální hloubka prohlubně [μm]	porovnání s rubínem [%]
karbid titanu	126,910	90,77
nitrid křemíku	127,710	91,35
zirkonium	115,400	82,54
ložisková ocel	139,900	100,06
rubín	139,810	100,00
TUL č.1	34,891	24,96
diamant	neměřitelné	-

V tabulce 7.2.9 je možné pozorovat porovnání výsledků maximální změřené hloubky prohlubně za podmínek experimentu popsanych v kapitole 7.2. Z výsledků je patrné, že poškození povrchu měřené součásti kuličkou vyrobenou z rubínu způsobilo největší změřenou hloubku prohlubně. V následujícím grafu (obr. 7.2.22) jsou patrné hloubky maximálních prohlubní jednotlivých prohlubní ve všech měřených řezech měřené součásti.



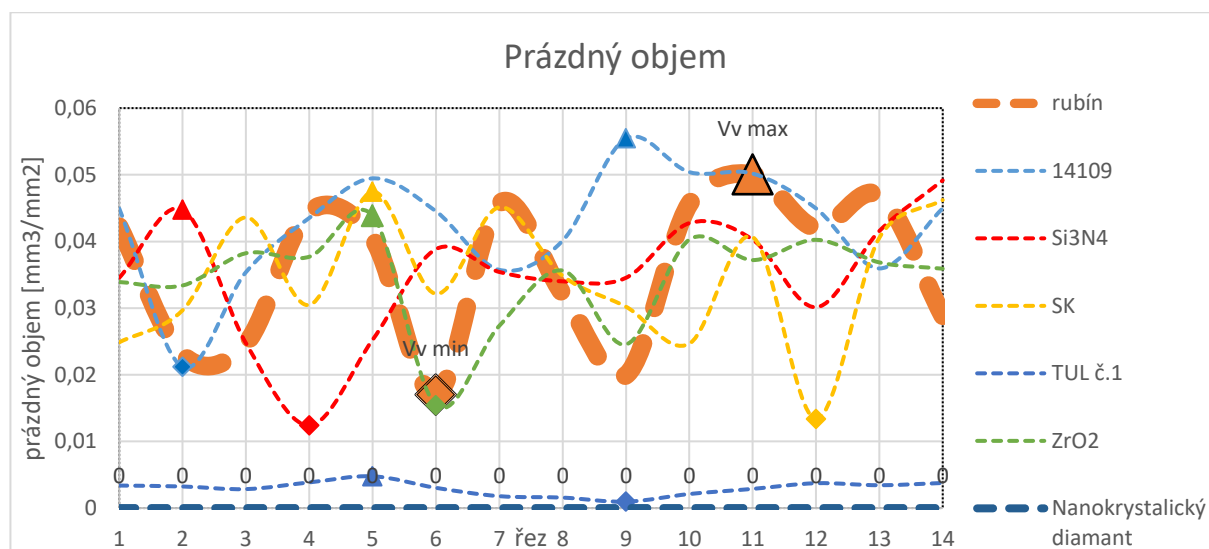
Obrázek 7.2.22 Maximální hloubka prohlubně, experiment s ISOPARAFINEM, porovnání

Jak již bylo zmíněno, stěžejním výsledkem pro vyhodnocení poškození měřené součásti se považují hodnoty prázdného objemu V_v . Porovnání těchto výsledků je uvedeno v následující tabulce 7.2.10.

Tabulka 7.2.10 Vyhodnocení prázdňého objemu V_v , experiment s ISOPARAFINEM, porovnání

	prázdňý objem V_v [mm ³ /mm ²]	porovnání s rubínem [%]
karbid titanu	0,035	96,19
nitrid křemíku	0,035	97,09
zirkonium	0,034	95,52
ložisková ocel	0,043	118,64
rubín	0,036	100,00
TUL č.1	0,003	8,21
diamant	neměřitelné	-

Z těchto výsledků je patrné, že povrch měřené součásti poškodila kulička ložiskové ocele, která poškodila zkoumaný povrch o 18,64 % více než kulička rubínu. Nejmenší poškození povrchu bylo naměřeno u kuličky TUL č.1, tato kulička poškodila povrch o 91,79 % méně než kulička rubínu. V následujícím grafu (obr. 7.2.23) jsou zobrazeny prázdňé objemy ve všech měřených řezech měřené součásti.



Obrázek 7.2.23 Vyhodnocení prázdňého objemu V_v , experiment s ISOPARAFINEM, porovnání

Z tohoto grafu je patrné, že nejvíce se od zbylých liší hodnoty prázdňého objemu pro kuličku z TUL č.1, a samozřejmě nanokrystalický diamant. Jelikož ostatní hodnoty se od sebe velmi neodlišují, bylo potřebné otestovat tyto hodnoty, zdali se od sebe významně statisticky liší. V programu MINITAB byl pro toto vyhodnocení zvolen test shodnosti rozptylu. Výsledky těchto testů jsou uvedeny v tabulce 7.2.11.

Tabulka 7.2.11 Výsledky testů shodnosti rozptylů

T-test						
rozdíl na hladině významnosti 95%						
	ložisková ocel	rubín	nitrid křemíku	karbid titanu	TUL č.1	Oxid zirkonu
ložisková ocel		x	✓	✓	✓	✓
rubín	x		x	x	✓	x
nitrid křemíku	✓	x		x	✓	x
karbid titanu	✓	x	x		✓	x
TUL č.1	✓	✓	✓	✓		✓
oxid zirkonu	✓	x	x	x	✓	

Kde:

✓ – je mezi nimi statisticky významný rozdíl, tudíž na hladině významnosti 95% zamítáme nulovou hypotézu, že rozptyly naměřených hodnot jsou shodné

x – není mezi nimi významný statisticky významný rozdíl, tudíž na hladině významnosti 95% nezamítáme nulovou hypotézu, že rozptyly naměřených hodnot jsou shodné

Na základě těchto výsledků je patrné, že mezi dvěma nejpoužívanějšími materiály kuliček měřicích doteků, kterými je rubín a ložisková ocel, není významný rozdíl.

Avšak pro vyvození závěru a doporučení vhodnosti materiálu kuliček měřicích doteků je třeba analyzovat poškození samotných kuliček měřicích doteků. Toto poškození je vyhodnoceno v tabulce 7.2.12.

Tabulka 7.2.12 Experiment č.2, vyhodnocení poškození kuliček měřicích doteků

	objem [μm^3]		porovnání s rubínem [%]
	odbroušený materiál	nanesený materiál	
karbid titanu	x	1 613 117	546,29
nitrid křemíku	x	111 635	37,81
zirkonium	x	5 513 012	1867,01
ložisková ocel	x	671 754	227,49
rubín	x	295 285	100,00
TUL č.1	14 282 807	x	-4836,96
Nanokrystalický diamant	neměřitelné		-

V porovnání s rubínem kladné znaménko značí nános materiálu na povrch kuličky a záporné znaménko odstranění materiálu kuličky měřicího doteku.

Předmětem zkoumání byla celková změna povrchu kuličky měřicího doteku, proto je možné že pod nánosem materiálu může být materiál kuličky odbroušen. Takové poškození není předmětem zkoumání. Vypočítané hodnoty objemů jsou pouze pro vrcholek kuličky o průměru 320 μm . Poškození povrchu celé plochy kuličky měřicího doteku je jistě větší než tyto naměřené hodnoty.

Z předchozích dat je patrné, že pouze kulička vyrobená z TUL č.1 se značně odbrousila. Nejvíce materiálu se nanoslo na povrch měřicí kuličky ze zirkonia.

Prvkovou analýzou bylo zjištěno, že nános na kuličce měřicího doteku je tvořen materiálem kuličky měřicího dotyku, přetvořeným materiálem měřené součásti, zbytky konzervační a čistící emulze s isoparafinem.

Na základě výše zmíněných dat se doporučuje používání měřicích doteků z nanokrystalického diamantu a nitridu křemíku. Nedoporučuje se používání měřicích doteků z TUL č.1, zirkonia a karbidu titanu. Zbylé doteky se doporučují používat pouze na základě vlastního uvážení.

7.3 Vyhodnocení experimentu č.3

Tento experiment vychází z podmínek definovaných v kapitole 6.1, tudíž za stejných podmínek jako předchozí experimenty. Jedinou změnou se stalo ošetření povrchu vzorku. Tento experiment byl proveden na vzorku AL2.

Před provedením experimentu byl povrch měřené součásti odmaštěn lékařským benzínem a následně byl na povrch měřené součásti nanesen film syntetické chladicí kapaliny, která se v průmyslu běžně používá při broušení hliníkových slitin. Pro tento experiment byla použita syntetická chladicí emulze TRIM C272. [23]

Analýzou bylo zjištěno, že při výrobě součástí z hliníkových slitin v průmyslu proces čištění a konzervace není zařazen vůbec.

Takto ošetřená měřená součást se upevnila na experimentální zařízení (obr. 4.1.3) a následně se nechala po dobu 4 hodin odstát. Takto postavený experiment má simulovat vynechání procesu čištění před rozměrovou kontrolou součásti.

Během tohoto experimentu je očekávaná minimalizace výsledného poškození měřené součásti a také minimalizace množství nánosů nanesených na kuličku měřicího doteku. V tabulce 7.3.1 jsou uvedeny naměřené teploty a relativní vlhkost vzduchu během provádění tohoto experimentu.

Tabulka 7.3.1 Laboratorní podmínky během experimentu č. 3

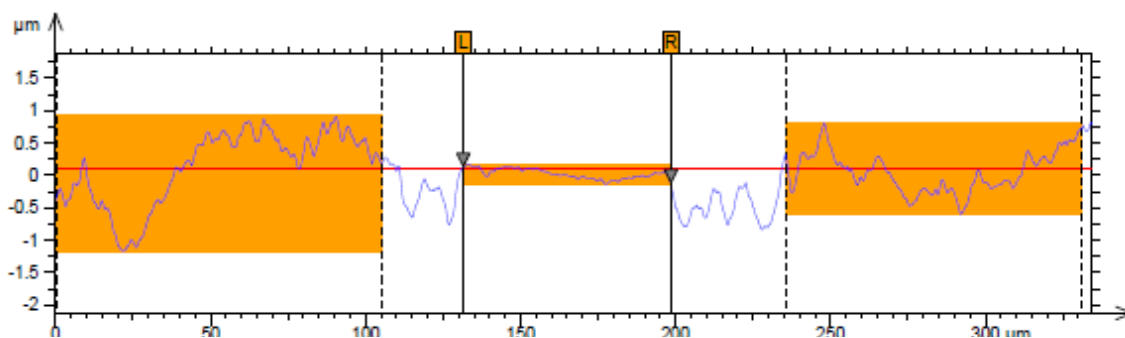
	Teplota [°C]	Relativní vlhkost vzduchu [%]
	24,2	24,7
	24,2	24,8
	23,4	25
	24,3	23,9
	24,4	23,7
	24,3	23,9
	24,4	23,2
	24,4	23,2
	24,5	22,9
	24,5	22,8
	24,5	23,2
xbar	24,26	23,706
R	1,1	2,2
s _x	0,27	0,685

Tabulka 7.3.2 obsahuje změnu rychlosti otáčení měřené součásti během provádění tohoto experimentu.

Tabulka 7.3.2 Rychlost otáčení součásti během experimentu č.3

Rychlost otáčení měřené součásti (RPM)									
30,241	29,801	30,445	29,234	28,253	28,856	29,114	30,936	28,982	29,177
				RPM	29,5039				
				R	2,683				
				s_{ot}	0,8271				

Při provedení takto připraveného experimentu bylo zjištěno, že při použití měřicího doteku z tvrdokovu (v tomto případě se jednalo o karbid titanu) nitridu křemíku, zirkonia, ložiskové oceli a nanokrystalického diamantu dochází pouze k minimálnímu poškození měřené součásti. Toto opotřebení je ve většině případů neměřitelné, jelikož se výše zmíněné materiály měřicích doteků chovají jako nanokrystalický diamant v experimentu č.2 popsany v kapitole 7.2.7. Tudiž dochází k pouze k zaleštění povrchu měřené součásti, což je patrné v obrázku 7.3.1.



Na obrázku je možné sledovat zmíněné zaleštění povrchu měřené součásti, kde je patrný přenos materiálu z výstupků textury povrchu měřené součásti do oblasti prohlubní.

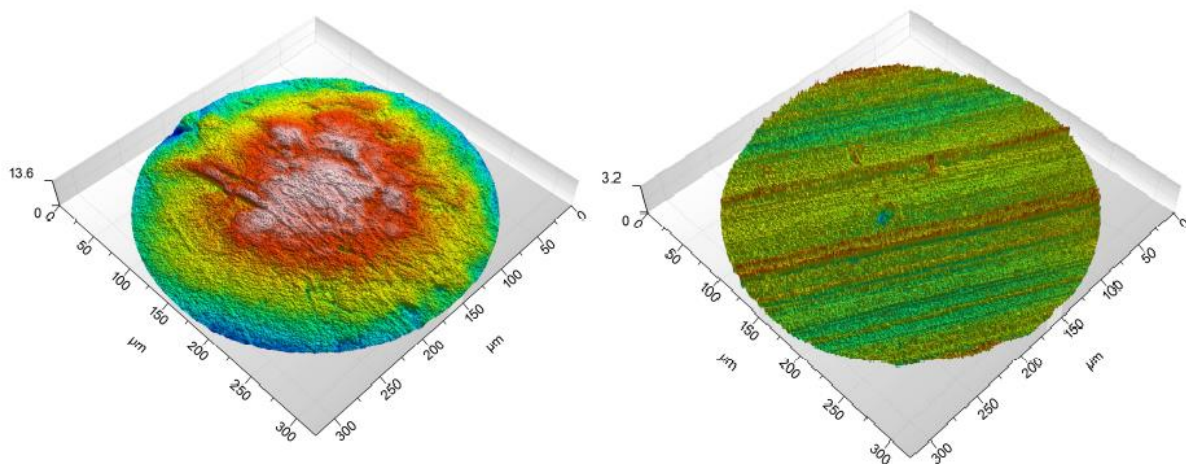
V případě měřicího doteku z karbidu titanu a nanokrystalického diamantu, nebylo prokazatelné poškození povrchu měřené součásti změřeno v ani jednom ze čtrnácti řezů. Znamky poškození nevykazuje ani povrch kuličky měřicího doteku.

Při použití měřicího doteku z nitridu křemíku bylo naměřeno poškození povrchu součásti změřeno pouze v jednom ze 14ti řezů, a to v řezu č. 7. Kde šířka průměrného profilu činila $Y_p = 115,08 \mu m$, maximální hloubka prohlubně $Z_{max} = 2,5132 \mu m$, maximální průměrná hloubka prohlubně $Z_p = 0,47565 \mu m$ a prázdný objem prohlubně $V_v = 0,5472 \mu m^3 / \mu m^2$. Kulička měřicího doteku jeví známky abrazivního opotřebení. Objem obroušeného materiálu z kuličky měřicího doteku byl $331,33 \mu m^3$.

U měřicího doteku ze zirkonia bylo naměřeno poškození povrchu součásti pouze v řezu 13. Kde šířka průměrného profilu činila $Y_p = 131,43 \mu m$, maximální hloubka prohlubně $Z_{max} = 2,1648 \mu m$, maximální průměrná hloubka prohlubně $Z_p = 0,47392 \mu m$ a prázdný objem prohlubně $V_v = 0,22211 \mu m^3 / \mu m^2$. Kulička měřicího doteku jeví známky abrazivního opotřebení. Objem obroušeného materiálu z kuličky měřicího doteku byl $387,06 \mu m^3$.

V případě použití měřicích doteků z ložiskové oceli a kompozitního materiálu TUL č.1 nebylo v žádném ze snímaných řezů, povrchu měřené součásti, nalezeno jakékoliv poškození. Jediný rozdíl se nachází v poškození povrchu kuličky měřicího doteku. Dotek z ložiskové oceli nese také známky abrazivního opotřebení, objem obroušeného materiálu z kuličky měřicího doteku činí $345,4 \mu\text{m}^3$.

U měřicího doteku z kompozitního materiálu TUL č.1 došlo k jeho naprosté devastaci. Na obrázku 7.3.2 vpravo je původní stav měřicího doteku a vlevo stav měřicího doteku po provedení experimentu. Objem chybějícího materiálu z této kuličky činí $343\,120 \mu\text{m}^3$.



Obrázek 7.3.2 a) výchozí stav měřicího doteku TUL č.1 b) měřicí dotek TUL č.1 po provedení experimentu

7.3.1 Rubín

V následující tabulce (tab. 7.3.3) jsou uvedeny experimentálně získaná data pro opotřebení měřené součásti měřicím dotekem z rubínu. Během celého experimentu bylo dbáno na dodržování podmínek uvedené v kapitole 6.1 a doplnění podmínek z kapitoly 7.3.

Tabulka 7.3.3 Hodnoty poškození vzorku AL2, s naneseným filmem řezné kapaliny, způsobené měřicím dotekem z rubínu

		F_p [N]	F_k [N]	Y_p [μm]	Z_{\max} [μm]	Z_p [μm]	V_v [$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$]
místo	1	1,469	1,469	117,04	2,7428	0,42983	0,61991
	2	1,473	1,473	126,52	3,1867	0,81377	3,8505
	3	1,476	1,476	110,83	2,6855	0,94396	1,4169
	4	1,478	1,478	120,27	2,3128	0,20838	1,7437
	5	1,477	1,477	neměřitelné			
	6	1,475	1,475	136,98	2,3645	0,25715	1,3249
	7	1,472	1,472	149,73	2,1512	0,19692	1,6816
	8	1,468	1,468	127,5	2,9461	0,61586	1,1032
	9	1,465	1,465	111,48	2,5541	0,49303	1,8683
	10	1,462	1,462	106,25	2,0992	0,50937	0,26892
	11	1,461	1,461	123,25	2,6649	0,5191	1,8336
	12	1,461	1,461	148,43	2,5587	0,45891	0,27045
	13	1,463	1,463	neměřitelné			
	14	1,466	1,466	118,02	2,3314	0,36863	0,14098
x_{\max}		1,478		149,7300	3,187	0,944	3,850500
x_{\min}		1,461		106,2500	2,099	0,197	0,140980
R		0,017		43,4800	1,088	0,747	3,709520
\bar{x}		1,469		124,6917	2,550	0,485	1,343580
s_x		0,006		14,0911	0,321	0,227	1,018663

Během první otáčky měřené součásti byla největší naměřená síla v řezu číslo 4 a to $F_p = 1,478 \text{ N}$, největší síla během poslední otáčky byla také v řezu číslo 4 a to $F_k = 1,478 \text{ N}$. Je tedy patrné, že přitlačná síla se opět během experimentu nijak nezměnila. Průměrná přitlačná síla během tohoto experimentu byla $\bar{F} = 1,469 \text{ N}$ s rozpětím $R_F = 0,017 \text{ N}$ (směrodatnou odchylkou $s_F = 0,006 \text{ N}$).

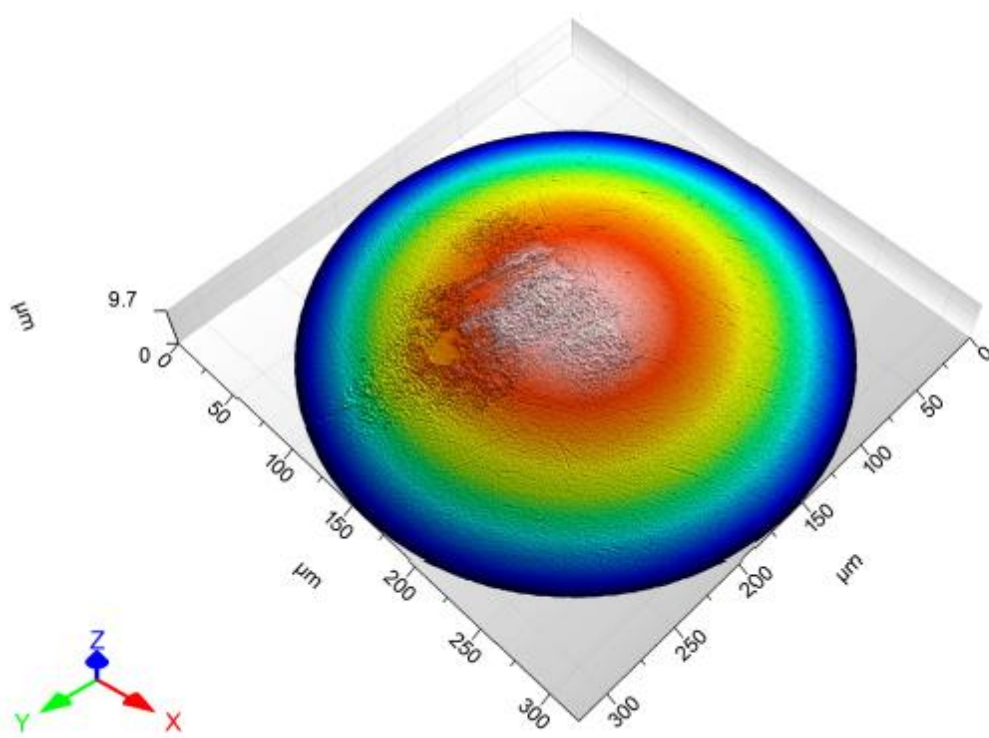
Největší naměřená šířka prohlubně průměrného profilu způsobená měřicím dotykem byla změřena v řezu 7, kde $Y_p = 149,73 \mu\text{m}$. Na základě naměřených dat byla průměrná šířka prohlubně průměrného profilu $\bar{Y}_p = 124,69 \mu\text{m}$, s rozpětím $R_{Y_p} = 43,48 \mu\text{m}$ a směrodatnou odchylkou $s_{Y_p} = 14,09 \mu\text{m}$.

Dále byla vyhodnocena maximální hloubka prohlubně. Největší maximální hloubka prohlubně byla naměřena v řezu číslo 2 ve kterém $Z_{\max} = 3,1867 \mu\text{m}$, průměrná maximální hloubka byla potom $\bar{Z}_{\max} = 2,55 \mu\text{m}$. S rozpětím $R_{Z_{\max}} = 1,088 \mu\text{m}$ a směrodatnou odchylkou $s_{Z_{\max}} = 0,321 \mu\text{m}$. Stejným způsobem byla vyhodnocena i průměrná hloubka prohlubně Z_p jejíž maximum se nacházelo v řezu číslo 3.

Největší důraz je kladen na parametr prázdného objemu V_v , který zohledňuje všechny předchozí rozměrové parametry opotřebení měřené součásti. Největší naměřená hodnota prázdného objemu se nacházela ve 2. řezu a činila $V_v = 3,8505 \frac{\mu\text{m}^3}{\mu\text{m}^2}$. Průměrná hodnota

prázdného objemu pro danou prohlubeň je $\bar{V}_V = 1,34358 \mu\text{m}^3 / \mu\text{m}^2$, rozptyl hodnot byl $R_{V_V} = 3,709520 \mu\text{m}^3 / \mu\text{m}^2$ a směrodatná odchylka $s_{V_V} = 1,018663 \mu\text{m}^3 / \mu\text{m}^2$.

Na povrch kuličky měřicího doteku z rubínu se stejně jako v předchozích případech nanese materiál z měřené součásti. Objem tohoto materiálu je $1718,1 \mu\text{m}^3$ s maximální výškou $1,5987 \mu\text{m}$. Toto poškození lze vidět na obrázku 7.3.3.



Obrázek 7.3.3 Poškození kuličky měřicího doteku z rubínu po provedení experimentu s chladicí kapalinou

Z předchozích dat je zjevné, že z použitých materiálů měřicích doteků je rubín nejméně vhodný pro měření součástí z hliníkových slitin. Jelikož bylo dokázáno, že jako jediný při měření délce 100 metrů, přítláčné síle 1,47 N a namazaném povrchu měřené součásti, poškozuje její povrch.

8 DOPORUČENÍ PRO PRAXI

V části 8.1 je uvedeno doporučení pro volbu materiálu měřicího doteku na základě analýzy poškození povrchu měřené součásti. V podkapitole 8.2 je řešen výběr materiálu měřicího doteku na základě analýzy opotřebení povrchu doteků.

8.1 Volba měřicího doteku na základě analýzy poškození měřené součásti

V následujících tabulkách jsou porovnány výsledky ze všech tří experimentů popsaných v kapitole 6 pojmenovaných podle prostředku, kterým byl ošetřen povrch měřené součásti před zahájením experimentů (lékařský benzín, isoparafin a chladicí emulze). Lékařský benzín byl použit pro odmaštění povrchu, isoparafin pro konzervaci součásti a chladicí emulze pro definované namazání měřené součásti. Během experimentů byly dodržovány definované podmínky:

- Měřená délka 100 m
- Konstantní rychlost otáčení 30 RPM
- Přítlačná síla odvozena od tlačné pružiny 1,6N s krycí manžetou

Tabulka 8.1.1 Porovnání maximálních hodnot Z_{max}

Materiál měřicího doteku	Porovnání maximálních hodnot Z_{max} [μm]		
	Úprava povrchu vzorku		
	Lékařský benzín (experiment č.1)	Isoparafin (experiment č.2)	Chladicí emulze (experiment č.3)
Karbid titanu	84,018	126,91	-
Nitrid křemíku	91,905	127,71	-
Oxid zirkonu	101,750	115,400	-
Ložisková ocel	86,93	139,90	-
Rubín	78,894	139,81	3,1867
TUL č.1	x ⁵	34,891	-
Nanokrystalický diamant	-	-	-

- neměřitelné poškození povrchu měřené součásti

Z tabulky 8.1.1 vyplývá, že v případě zvolení maximální hloubky prohlubně Z_{max} jako hodnotícího kritéria, se jednoznačně doporučuje používat, pro měření součástí ze siluminu, měřicí dotek z nanokrystalického diamantu. V případě experimentu č.1 se pohybovala maximální hloubka prohlubně rozmezí přibližně 79-102 μm, během experimentu č.2 35-140 μm a v případě experimentu č.3 byla zanedbatelná kromě prohlubně vytvořené rubínem.

Zároveň se nedoporučuje používat měřicí dotek z rubínu, který poškozuje povrch měřené součásti vždy bez ohledu na předchozí ošetření povrchu měřené součásti.

⁵ V době provádění experimentu nebyl měřicí dotek z kompozitního materiálu TUL č.1 k dispozici

Tabulka 8.1.2 Porovnání maximálních hodnot Z_p

Materiál měřicího doteku	Porovnání maximálních hodnot Z_p [μm]		
	Úprava povrchu vzorku		
	Lékařský benzín (experiment č.1)	Isoparafín (experiment č.2)	Chladicí emulze (experiment č.3)
Karbid titanu	52,619	81,073	-
Nitrid křemíku	55,669	78,133	-
Oxid zirkonu	62,480	76,93	-
Ložisková ocel	55,246	87,847	-
Rubín	47,319	89,328	0,94396
TUL č.1	×	7,0635	-
Nanokrystalický diamant	-	-	-

V případě požadavku na hodnocení průměrné hloubky prohlubně na měřené součásti se na základě tabulky 8.1.2 opět doporučuje používání měřicího doteku z nanokrystalického diamantu a nedoporučuje se používání měřicího doteku z rubínu. Oproti porovnání maximálních hloubek prohlubně se změnilo pouze pořadí jednotlivých doteků v míře poškození.

Nejprůkaznější výsledky jsou obsaženy v tabulce 8.1.3, ve které jsou porovnány maximální hodnoty parametru prázdného objemu. Tento parametr nejvíce vypovídá o celkové charakteristice prohlubně vzniklé kontaktním měřením.

Tabulka 8.1.3 Porovnání maximálních hodnot parametru V_v

Materiál měřicího doteku	Porovnání maximálních hodnot V_v		
	Úprava povrchu vzorku		
	Lékařský benzín (experiment č.1)	Isoparafín (experiment č.2)	Chladicí emulze (experiment č.3)
	$[\text{mm}^3/\text{mm}^2]$	$[\text{mm}^3/\text{mm}^2]$	$[\text{mm}^3/\text{mm}^2]$
Karbid titanu	0,023625	0,047452	-
Nitrid křemíku	0,029515	0,049159	-
Oxid zirkonu	0,032178	0,043849	-
Ložisková ocel	0,023677	0,055452	-
Rubín	0,023636	0,050022	$3,8505 \cdot 10^{-9}$
TUL č.1	×	0,0047661	-
Nanokrystalický diamant	-	-	-

- neměřitelné poškození povrchu měřené součásti

Na základě předchozích výsledků měření se jednoznačně doporučuje pro měření součástí ze siluminu používat měřicí doteky z nanokrystalického diamantu. V průběhu experimentů 1-3 se nepodařilo prokázat, že tento materiál měřicího doteku způsobuje poškození povrchu měřené součásti. Přes to, že jej prokazatelně ovlivňuje, tak nezhoršuje kvalitu povrchu součásti. Zároveň můžeme konstatovat, že poškození kuličky měřicího doteku z nanokrystalického diamantu nebylo po provedení experimentů měřitelné.

Používání nanokrystalického diamantu jako materiálu kuličky měřicího doteku je jednoznačně nejnákladnější, jeho cena je přibližně 300x vyšší než cena rubínové kuličky. Proto z ekonomických důvodů je nutné volit materiál kuličky měřicího doteku na základě předchozího ošetření povrchu měřené součásti a požadavku na texturu povrchu této součásti.

Jako alternativu používání měřicího doteku z nanokrystalického diamantu je možné doporučit použití libovolného měřicího doteku kromě rubínu. Ovšem nutnou podmínkou je zařazení procesu rozměrové kontroly, pro dynamické metody měření, před proces čištění a konzervaci součástí. Ponechání mazacího filmu zamezíme vzniku poškození povrchu měřené součásti. Touto změnou se docílí možnosti používání levných materiálů měřicích doteků, jakým je například ložisková ocel.

Za předpokladu, že toto opatření není možné zavést, zejména kvůli nutnosti okamžité konzervace součásti kvůli rychlé degradaci materiálu součásti, doporučuje se používat kuličky měřicích doteků z keramiky (např. nitrid křemíku nebo oxid zirkonu) nebo tvrdokovu (karbid titanu).

Jako nejméně vhodné materiály pro měření součástí ze siluminu se jeví paradoxně nejpoužívanější materiály měřicích doteků, kterými jsou rubín a ložisková ocel. Právě měřicí dotek z rubínu způsoboval poškození povrchu měřené součásti i při jeho definovaném namazání. Tím se podařilo potvrdit předpoklad firmy RENISHAW zformulovaný v kapitole 5.2.5

V pořadí druhé nejmenší poškození povrchu měřené součásti způsoboval měřicí dotek z kompozitního materiálu TUL č.1. Přes jeho nízkou cenu se nedoporučuje tento materiál používat kvůli jeho nízké životnosti, tudíž jeho častější výměně ve snímači a tím zvýšených nákladů na údržbu, častější odstávky měřicích automatů atd.

8.2 Volba měřicího doteku na základě analýzy jeho opotřebení

V tabulce 8.2.1 je uvedeno opotřebení kuliček měřicích doteků během jednotlivých experimentů. Kladná hodnota značí nanesení materiálu na povrch kuličky měřicího doteku, záporná značí odbroušení materiálu kuličky.

Tabulka 8.2.1 Hodnoty poškození kuliček měřicího doteku

Materiál měřicího doteku	Poškození kuličky měřicího doteku [μm^3]		
	Úprava povrchu vzorku		
	Lékařský benzín (experiment č.1)	Isoparafín (experiment č.2)	Chladicí emulze (experiment č.3)
Karbid titanu	+69 246	+1 613 117	neměřitelné
Nitrid křemíku	+91 912	+111 635	-331,33
Oxid zirkonu	+36 005	+5 513 012	-387,06
Ložisková ocel	+469 017	+671 754	-345,4
Rubín	+626 223	+295 285	+1 718,1
TUL č.1	×	-14 282 807	-343 120
Nanokrystalický diamant		neměřitelné	

Z tabulky je patrné, že při provádění experimentu s odmaštěným povrchem součásti lékařským benzínem se nejvíce materiálu nanese na povrch kuličky rubínu. Při provádění experimentu s isoparafínem se nejvíce materiálu nanese na povrch kuličky z karbidu titanu. Zároveň při stejném experimentu se nejvíce materiálu odbrousilo z kuličky TUL č.1. Přesto že se jedná o velké číslo je třeba si uvědomit, že uvedený objem má jednotku μm^3 . Převodem jednotek získáme hodnotu $0,014 \text{ mm}^3$, což je přibližně 1% z celkového objemu kuličky měřicího doteku. Při experimentu s chladicí emulzí se materiál nanese na jedinou kuličku a tou byla rubínová kulička. Nejvíce materiálu se poté opět odbrousilo z kuličky TUL č.1.

Z pohledu metrologie důležitějším parametrem je změna průměru kuličky měřicího doteku, v místě kontaktu s měřenou součástí, po provedení experimentu. Z důvodu možné kalibrace nebo plánování výměny kuličky měřicího doteku. Tyto změny jsou popsány v tabulce 8.1.5.

Tabulka 8.2.2 Změna rozměru kuličky po provedení experimentu

Materiál měřicího doteku	Změna rozměru kuličky po provedení experimentu [μm]		
	Úprava povrchu vzorku		
	Lékařský benzín (experiment č.1)	Isoparafín (experiment č.2)	Chladicí emulze (experiment č.3)
Karbid titanu	+11,50	+43,485	neměřitelné
Nitrid křemíku	+13,29	+29,428	-0,7652
Oxid zirkonu	+7,20	+85,322	-0,8383
Ložisková ocel	+42,27	+51,002	-0,5031
Rubín	+30,40	+46,382	+1,5987
TUL č.1	×	-70,172	-10,8040
Nanokrystalický diamant		neměřitelné	

Při výběru měřicího doteku na základě kritéria jeho minimálního opotřebení vycházíme z dat obsažených v tabulce 8.1.5.

Pro experiment č.1 je typické nanášení materiálu na kuličky měřicích doteků. Výška těchto nánosů se pohybuje od 7 do 42 μm. Při odmaštění povrchu lékařským benzínem se nedoporučuje používat kuličky měřicího doteku z ložiskové ocele a rubínu, jelikož se materiál nanesený na jejich povrch dosahoval výšek v řádu desítek mikrometrů. Materiál, který lze doporučit je keramika, jelikož nejmenší objem materiálu na sebe nanasly kuličky z nitridu křemíku a zirkonia.

Během experimentu č.2 bylo možné opět sledovat nánosy materiálů na kuličky měřicích doteků kromě materiálu TUL č.1 jehož průměr se v místě doteku se součástí zmenšil o 70 μm. Pro měření součástí ošetřených isoparafínem se doporučuje použít kuličky z nitridu křemíku a karbidu titanu. Naopak nedoporučuje se použít kuličky ze zirkonia a ložiskové ocele.

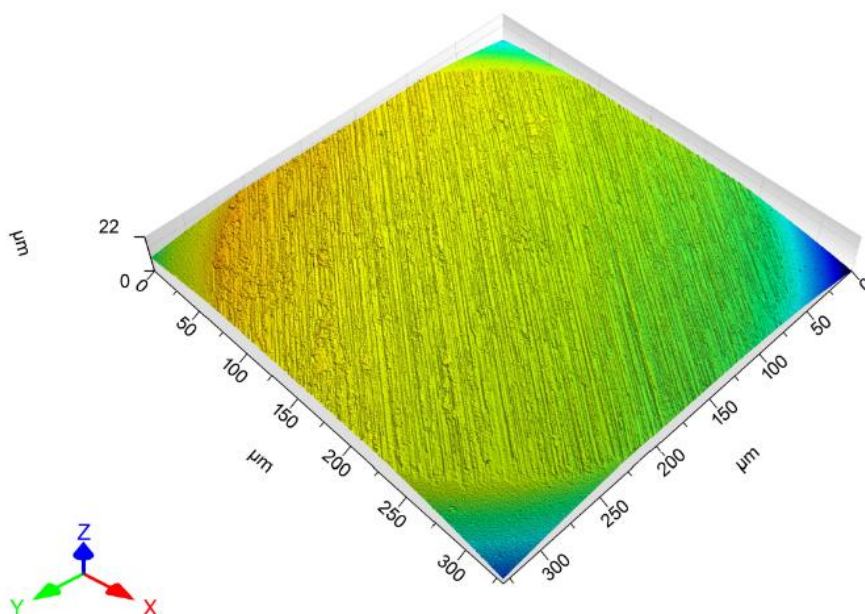
V případě, že na povrchu měřené součásti zůstaly zbytky chladicích emulzí, je možné zvolit libovolný materiál měřicího doteku, kromě rubínu. Který na sebe nanas vrstvu materiálu, čímž zvětšil svůj průměr o 1,6 μm. Zbylé doteky jsou opotřebeny jen minimálně.

Z naměřených dat vyplývá, že pro všechny podmínky měření se jednoznačně doporučuje používat kuličky z nanokrystalického diamantu, na jehož povrchu nejsou sledovány žádné změny. Měřicí dotek z kompozitního materiálu TUL č.1 se doporučuje nepoužívat.

9 ZÁVĚR

V této práci jsou splněny všechny cíle zadané cíle včetně jejich upřesnění z druhé kapitoly.

Kapitola 3 obsahuje analýzu požadavků na měřicí doteky. I přes fakt, že požadavky na měřicí zařízení nejsou jednotné, dosud v dostupné literatuře chyběla formulace požadavku na minimální poškození povrchu měřené součásti. Dále je zde řešen mechanismus vzniku poškození, avšak během provádění experimentů bylo patrné, že adheze není jediným mechanismem poškozování povrchu součásti. Při provádění experimentů se vlivem kontaktu kuličky měřicího doteku a součásti vytvářely třísky, které v tomto procesu fungovaly jako brusivo. Tuto teorii podporují stopy abrazivního opotřebení zjištěné na měřicím doteku z nitridu křemíku, který je zobrazen na obrázku 9.1.1.



Obrázek 9.1.1 Stopy abrazivního opotřebení na měřicím doteku z nitridu křemíku

Výsledný mechanismus poškozování součásti je patrně kombinací adhezivního a abrazivního opotřebení, avšak není vyloučeno, že tento jev je kombinací ještě dalších mechanismů opotřebení. Pro jasné popsání mechanismu poškození měřené součásti se doporučuje provést experiment s vyhodnocováním poškození povrchu součásti po dílčích částech stanovené měřené délky. Například použít měřicí dotek z rubínu a vyhodnotit změnu textury povrchu součásti po 5m, 10m, 15m, 30m a 60m.

Analýza vlastností použitých doteků byla zpracována v kapitole číslo 5. Porovnáním s výsledky této práce se podařilo potvrdit závěr firmy Renishaw, že měřicí dotek z rubínu není vhodný měření součástí z hliníkových slitin.

Ve 4. kapitole je popsána konstrukce experimentálních zařízení potřebných pro zajištění stanovených podmínek experimentů. V případě dalšího zpracování tohoto tématu se doporučuje výměna hřídele s kuželovým uložením, jelikož toto řešení nezaručovalo dostatečnou minimalizaci házení. Dalším vylepšením tohoto zařízení je konstrukce snímače otáček, který

dokáže analyzovat měřenou délku s větší přesností a po uražení požadované měřené délky by byl schopen experimentální zařízení automaticky zastavit.

Kapitola 7 obsahuje analýzu změn textury měřicích doteků a měřené součásti, na základě dat obsažených v této kapitole byly vytvořeny závěry, které jsou dále zformulovány v kapitole 8 ve formě doporučení pro praxi. Z naměřených dat je patrná velká variabilita výsledků, která je způsobena nerovnoměrným vytlačováním materiálu z dráhy měřicího doteku-zejména tvorbou „návarků“ v této dráze, které v některých místech dosahovaly výšky původního profilu měřené součásti.

Bylo zjištěno že jednou ze zásadních podmínek ovlivňující vznik poškození součástí je předchozí ošetření povrchu vzorku. Jednoznačně se doporučuje nečistit vyrobené součásti před rozměrovou kontrolou, jelikož na základě vyhodnocení naměřených dat bylo prokázáno, že toto opatření minimalizuje riziko vzniku poškození povrchu součástí. Přes to, že povrch měřené součásti je viditelně ovlivněn, tak nebylo možné změřit míru tohoto opotřebení. Tento jev lze vysvětlit jako plastickou deformaci povrchu součásti, kdy dochází k přemístění materiálu výstupků textury povrchu do míst prohlubní. Popsaná deformace povrchu součásti v místě měření zlepšuje výškové parametry textury povrchu. Zároveň toto opatření minimalizuje opotřebení kuličky měřicího doteku, čím se zvyšuje jeho životnost a zároveň se zachová přesnost měření mezi výměnami kuliček měřicích doteků.

Při volbě materiálu kuličky měřicího doteku se na prvním místě doporučuje nanokrystalický diamant. Tento materiál, při experimentech popsaných v této práci, měřitelně nepoškodil povrch součásti a kulička měřicího doteku z tohoto materiálu nevykazovala známky opotřebení.

Na závěr je možné doporučit pokračování v provedených experimentech a analýzách takto:

- Analýzu vlastností dalších materiálů měřicích doteků, například plastové materiály nebo kompozitní materiál TUL č.2, který byl v této práci také použit, ale jeho výsledky nejsou publikovány.
- Analýzu změn textury měřicích doteků a měřené součásti pro nastavení přitlačné síly na 0,16N, 0,65N a 4N.
- Ověření naměřených dat na jiném přístroji než CCI. Například kruhoměr s 2 μm hrotem
- Vyhodnocení poškození kuliček měřicích doteků pomocí počítačové tomografie.
- Zahájení spolupráce s Ústavem konstruování Fakulty strojního inženýrství v Brně

10 BIBLIOGRAFIE

- [1] JANKOVYCH, Robert, Martin WEIGL a Jan KUR. MEASUREMENT-INDUCED WEAR OF ALUMINIUM ALLOY PARTS. *MM Science Journal*. 2015, **2015**(04), 735-738. DOI: 10.17973/MMSJ.2015_12_201552. ISSN 18031269. Dostupné také z: <http://www.mmscience.eu/december-2015.html#201552>
- [2] ATTOTA, Ravikiran a Said JAHANMIR. Effect of Contact Pressure and Load on Wear of Alumina. *Wear*. 2001, **2001**(251), 980-984. ISSN 10.1016/S0043-1648(01)00739-6.
- [3] NICOLET, Anaïs, Alain KÜNG a Felix MELI. Study of sapphire probe tip wear when scanning on different materials. *Measurement Science and Technology*. 2012, **23**(9), 094016-. DOI: 10.1088/0957-0233/23/9/094016. ISSN 0957-0233. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0957-0233/23/i=9/a=094016?key=crossref.51c53830971e7d226e100ab1c30ad208>
- [4] WOOD, Robert J.K. *Multifunctional Materials for Tribological Applications*. Pan Stanford, 2015, 388 s. ISBN 9789814463904.
- [5] KŮR, Jan a Michal CHAMRAD. Indukční délkové snímače tvoří základ novodobé provozní měřicí techniky pro automobilovou výrobu. *TECH MEDIA PUBLISHING, s.r.o.* [online]. Praha: TechMagazín, 2012 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/571>
- [6] KŮR, Jan a Michal CHAMRAD. V kontrole autodílů převládají kontaktní měřicí metody. *Infocube s.r.o.* [online]. Brno: AutomobilIndustry, 2014 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://infocube.cz/v-kontrola-autodilu-prevladaji-kontaktne-merici-metody/>
- [7] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 978-80-7204-248-7.
- [8] WHITEHOUSE, D. *Handbook of surface and nanometrology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 978-142-0082-012.
- [9] PUŠKÁR, Anton. *Medzné stavy materiálov a súčastí*. Vyd. 1. Bratislava: Veda, 1989. ISBN 80-224-0020-3.
- [10] Imeco [online]. Brno: Imeco, 2000 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.imeco.cz/>
- [11] Peter Hirt GmbH. [online]. Switzerland: Peter Hirt GmbH., 2017 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.peterhirt.ch/>
- [12] Digitální otáčkoměr VOLTcraft DT-30LK, 2 - 200 000 ot./min. *Conrad* [online]. b.r. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/digitalni-otackomer-voltcraft-dt-30lk-2-200-000-ot->

min.k1012206?gclid=EAIaIQobChMIpdntsYub2wIVm4KyCh0aPQidEAAYAiAAEgIhxfD_BwE

- [13] ARDUINO UNO REV3. *ARDUINO* [online]. b.r. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- [14] Digitální siloměr SHITO model STO (FP). *Natis měřící přístroje a měřidla* [online]. b.r. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.natis.cz/digitalni-silomer-shito-model-sto-fp.htm>
- [15] DÉLKOMĚŘ S INDUKČNOSTNÍMI SNÍMAČI EDK 93 NÁVOD NA OBSLUHU. délkoměru standardního provedení. *DOCPLAYER* [online]. Brno: imeco spol. s.r.o, 1993 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/12040424-Delkomer-s-indukcnostnimi-snimaci-edk-93-navod-na-obsluhu-delkomeru-standardniho-provedeni-imeco-spol-s-r-o-marianske-nam-1-617-00-brno-cz.html>
- [16] POLMEAR, I. *Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals*. 4th ed. Burlington, MA: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 07-506-6371-5.
- [17] Slitina hliníku, EN 1676, zn. EN AB- AlSi9Cu3(Fe) (EN AB-46000), housky. *Ferona* [online]. Praha: Ferona, b.r. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/detail/32577/slitina-hliniku-en-1676-zn-en-ab-alsi9cu3-fe-en-ab-46000-housky>
- [18] *REDHILL PRECISION SPECIALTY BALLS* [online]. Praha: Redhill, 2015 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.redhill-balls.eu/cz/>
- [19] Materiál kuličky. In: *Renishaw* [online]. Renishaw, b.r. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/materialy--6423>
- [20] Doteky a příslušenství. *Renishaw* [online]. Velká Británie: Renishaw, b.r. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/materialy--6423>
- [21] Diamonds for engineers. *Zeiss* [online]. Diamond!Scan, b.r. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://us.probes.zeiss.com/diamond-scan/>
- [22] Isoparaffin Solvents - IP SOLVENT and IP CLEAN. *Idemitsu* [online]. Japan: Idemitsu Kosan Co.,Ltd., 2015 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.idemitsu.com/products/petrochemicals/chemicals/solvent.html>
- [23] TRIM C272 25ltr, syntet. chlad. kapalina. *Průmyslová maziva* [online]. Brno: T-LAB S.R.O., 2018 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.prumyslovamaziva.cz/prumyslovamaziva/eshop/3-1-PRUMYSLOVA-MAZIVA/10-2-Rezne-chladici-kapaliny/5/132-TRIM-C270-25ltr-syntet-chlad-kapalina//description#anch1>

11 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

11.1 Seznam zkratk

AL1	Měřená součást 1
AL2	Měřená součást 2
Al ₂ O ₃	Korund - rubín
CCI	Koherenční korelační interferomet Taylor Hobson TalyProfile Lite
EDK	Vyhodnocovací jednotka indukčnostních snímačů imeco EDK 93
<i>F</i>	Přítlačná síla [N]
<i>K_{adh}</i>	Součinitel adhezivního opotřebení [-]
<i>L</i>	Měřená délka [m]
LO	Laserový otáčkoměr
<i>p_m</i>	Kontaktní tlak [Pa]
R	Variační rozpětí
<i>R_m</i>	Pevnost v tahu [MPa]
RPM	Počet otáček za minutu
Si ₃ N ₄	Nitrid křemíku
<i>s_x</i>	Výběrová směrodatná odchylka
TiC	Karbid titanu
TUL	Technická univerzita v Liberci
<i>V_v</i>	Prázdný objem
<i>W_o</i>	Objemový otěr [mm ³ ·m ⁻²]
<i>xbar</i>	Průměrná hodnota
<i>Y_p</i>	Šířka průměrného profilu plochy
<i>Z_{max}</i>	Maximální hloubka prohlubně
<i>Z_p</i>	Maximální průměrná hloubka prohlubně
ZrO ₂	Zirkonium

11.2 Seznam tabulek

Tabulka 5.1.1 Chemické složení materiálu EN AB 46000 [16]	27
Tabulka 5.2.1 Vlastnosti kuličky karbidu titanu [17]	28
Tabulka 5.2.2 Vlastnosti kuliček nitridu křemíku [17]	28
Tabulka 5.2.3 Vlastnosti kuliček zirkonia [17]	29
Tabulka 5.2.4 Vlastnosti kuliček ložiskové oceli 14 109 [17]	29
Tabulka 5.2.5 Vlastnosti kuliček rubínu [17]	29
Tabulka 6.1.1 Opakování a porovnání experimentu z článku [1]	31
Tabulka 6.1.2 Charakteristiky použitých pružin	33
Tabulka 7.1.1 Laboratorní podmínky experimentu č.1	41
Tabulka 7.1.2 Hodnoty poškození vzorku AL1, odmaštěno lékařským benzínem, měřicí dotek karbidu titanu	42
Tabulka 7.1.3 Hodnoty poškození vzorku AL1, odmaštěno lékařským benzínem, měřicí dotek nitridu křemíku.....	44
Tabulka 7.1.4 Hodnoty poškození vzorku AL1, odmaštěno lékařským benzínem, měřicím dotek zirkonium	46
Tabulka 7.1.5 Hodnoty poškození vzorku AL1, odmaštěno lékařským benzínem, měřicí dotek ložiskové oceli 14 109	48
Tabulka 7.1.6 Hodnoty poškození vzorku AL1, odmaštěno lékařským benzínem, měřicí dotek rubínu	50
Tabulka 7.2.1 Laboratorní podmínky experimentu	53
Tabulka 7.2.2 Rychlost otáčení měřené součásti během experimentu	53
Tabulka 7.2.3 Naměřené hodnoty parametrů poškození vzorku AL1, ošetření isoparafinem, měřicí dotek karbidu titanu	54
Tabulka 7.2.4 Hodnoty poškození vzorku AL1, ošetření isoparafinem, měřicí dotek nitridu křemíku	58
Tabulka 7.2.5 Hodnoty poškození vzorku AL1, ošetření isoparafinem, měřicí dotek zirkonia	61
Tabulka 7.2.6 Hodnoty poškození vzorku AL1, ošetření isoparafinem, měřicí dotek ložiskové oceli.....	64
Tabulka 7.2.7 Hodnoty poškození vzorku AL1, ošetření isoparafinem, měřicí dotek rubínu .	67
Tabulka 7.2.8 Hodnoty poškození vzorku AL1, ošetření isoparafinem, měřicí dotek TUL č.1	70
Tabulka 7.2.9 Maximální hloubka prohlubně, experiment s ISOPARAFINEM, porovnání ...	75
Tabulka 7.2.10 Vyhodnocení prázdného objemu V_v , experiment s ISOPARAFINEM, porovnání	76
Tabulka 7.2.11 Výsledky testů shodnosti rozptylů.....	77
Tabulka 7.2.12 Experiment č.2, vyhodnocení poškození kuliček měřicích doteků	77
Tabulka 7.3.1 Laboratorní podmínky během experimentu č. 3.....	78
Tabulka 7.3.2 Rychlost otáčení součásti během experimentu č.3	79
Tabulka 7.3.3 Hodnoty poškození vzorku AL2, s naneseným filmem řezné kapaliny, způsobené měřicím dotekem z rubínu	81
Tabulka 8.1.1 Porovnání maximálních hodnot Z_{max}	83
Tabulka 8.1.2 Porovnání maximálních hodnot Z_p	84
Tabulka 8.1.3 Porovnání maximálních hodnot parametru V_v	84
Tabulka 8.2.1 Hodnoty poškození kuliček měřicího doteku	85

11.3 Seznam obrázků

Obrázek 3.2.1 Mechanismus adhezivního opotřebení	18
Obrázek 3.2.2 Očekávané poškození povrchu měřené součásti [2].....	19
Obrázek 4.1.1 Model experimentálního zařízení	21
Obrázek 4.1.2 Model použité hřídele.....	22
Obrázek 4.1.3 Experimentální zařízení.....	22
Obrázek 4.2.1 Polomostový indukčnostní snímač s kuličkovým vedením	23
Obrázek 4.2.2 Kladka měřicího doteku	23
Obrázek 4.4.1 Model zařízení pro měření přitlačné síly.....	24
Obrázek 4.4.2 Zařízení pro měření přitlačné síly	25
Obrázek 5.2.1 Závislost opotřebení kuliček měřicího doteku z rubínu a nanokrystalického diamantu v závislosti na měřené délce [17]	30
Obrázek 6.1.1 Porovnání výsledků experimentu [1]	31
Obrázek 6.1.2 Charakteristiky pružin	33
Obrázek 6.2.1 Měření součásti na CCI	34
Obrázek 6.2.2 Postup vyhodnocení poškození měřené součásti.....	34
Obrázek 6.2.3 Maximální hloubka prohlubně Z_{max}	36
Obrázek 6.2.4 Maximální průměrná hloubka prohlubně	36
Obrázek 6.2.5 Šířka průměrného profilu	37
Obrázek 6.2.6 Ořezaná plocha povrchu měřené součásti	37
Obrázek 6.2.7 Plocha s doplněnými body	38
Obrázek 6.3.1 Snímání povrchu kuličky měřicího doteku	39
Obrázek 6.3.2 Příklad vyfiltrovaného nánosu na kuličce měřicího doteku	40
Obrázek 6.3.3 Nasnímaný povrch poškozené kuličky měřicího doteku.....	40
Obrázek 7.1.1 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z karbidu titanu	43
Obrázek 7.1.2 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z nitridu křemíku	45
Obrázek 7.1.3 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku ze zirkonia.....	47
Obrázek 7.1.4 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z ložiskové oceli	49
Obrázek 7.1.5 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z rubínu	51
Obrázek 7.1.6 Povrch měřené součásti po provedení experimentu s nanokrystalickým diamantem.....	52
Obrázek 7.1.7 Povrch měřicího doteku z nanokrystalického diamantu po provedení experimentu.....	52
Obrázek 7.2.1 Graf průběhu maximální hloubky prohlubně – Karbid titanu	55
Obrázek 7.2.2 Prohlubeň - řez č.3, experiment s isoparafinem - Karbid titanu.....	55
Obrázek 7.2.3 Poškození vzorku AL1, ošetřeným isoparafinem, způsobené měřicím dotekem z karbidu titanu	56
Obrázek 7.2.4 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z karbidu titanu	57
Obrázek 7.2.5 Graf průběhu maximální hloubky prohlubně – Nitrid křemíku	59
Obrázek 7.2.6 Prohlubeň - řez č.14, experiment s isoparafinem - Nitrid křemíku.....	59
Obrázek 7.2.7 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z nitridu křemíku	60
Obrázek 7.2.8 Graf průběhu maximální hloubky prohlubně – Zirkonium	62

Obrázek 7.2.9 Prohlubeň - řez č.5, experiment s isoparafinem - Zirkonium	62
Obrázek 7.2.10 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku ze zirkonia	63
Obrázek 7.2.11 Graf průběhu maximální hloubky prohlubně – ložisková ocel	65
Obrázek 7.2.12 Prohlubeň - řez č.8, experiment s isoparafinem – ložisková ocel	65
Obrázek 7.2.13 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z ložiskové oceli	66
Obrázek 7.2.14 Graf průběhu maximální hloubky prohlubně – Rubín	68
Obrázek 7.2.15 Prohlubeň - řez č.11, experiment s isoparafinem - Rubín	68
Obrázek 7.2.16 Nános materiálu na kuličce měřicího doteku z rubínu	69
Obrázek 7.2.17 Poškození vzorku AL1, ošetřeným isoparafinem, způsobené měřicím dotekem z TUL č.1	71
Obrázek 7.2.18 Prohlubeň - řez č.7, experiment s isoparafinem – TUL č.1	71
Obrázek 7.2.19 Obroušená kulička TUL č.1	72
Obrázek 7.2.20 Dráha měřicího doteku z nanokrystalického diamantu	73
Obrázek 7.2.21 Profil textury povrchu součásti měřený měřicím dotekem z nanokrystalického diamantu	73
Obrázek 7.2.22 Maximální hloubka prohlubně, experiment s ISOPARAFINEM, porovnání	75
Obrázek 7.2.23 Vyhodnocení prázdného objemu Vv, experiment s ISOPARAFINEM, porovnání	76
Obrázek 7.3.1 Zaleštění povrchu měřené součásti během experimentu č.3 za použití doteku z ložiskové oceli, ve snímaném řezu č. 11	79
Obrázek 7.3.2 a) výchozí stav měřicího doteku TUL č.1 b) měřicí dotek TUL č.1 po provedení experimentu	80
Obrázek 7.3.3 Poškození kuličky měřicího doteku z rubínu po provedení experimentu s chladicí kapalinou	82
Obrázek 9.1.1 Stopy abrazivního opotřebení na měřicím doteku z nitridu křemíku	87

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A Program snímače pro sledování měřené délky	97
Příloha B Výsledky opakovaného experimentu	99
Příloha C Naměřené hodnoty zdvihu a síly pružiny 1,6N s krycí manžetou	102
Příloha D Příklad protokolu vyhodnocení naměřené prohlubně ze CCI	103

CD s protokoly vyhodnocení všech prohlubní na CCI rozčleněné do adresářů podle jednotlivých experimentů

PŘÍLOHY

Příloha A Program snímače pro sledování měřené délky

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include "DHT.h"
#define pinDHT 10
#define typDHT22 DHT22
DHT mojeDHT(pinDHT, typDHT22);
LiquidCrystal lcd(12,11,5,4,7,2);
const int buttonPin = 3;
int buttonPushCounter = -1;
int buttonState = 0;
int lastButtonState = 0;
float prumerVzorku=88.63; // průměr měřené součásti [mm]
float pi= 3.14159;
void setup() {
    pinMode(buttonPin, INPUT);
    lcd.begin(12,6);
    mojeDHT.begin();
    Serial.begin(9600);
}
void loop() {
    buttonState = digitalRead(buttonPin);
    if (buttonState != lastButtonState) {
        if (buttonState == HIGH) {
            buttonPushCounter++;
            lcd.setCursor(0,0);
            lcd.print("REVS:");
            lcd.print(buttonPushCounter);
            lcd.setCursor(0,1);
            lcd.print("dist:");
            lcd.print(((prumerVzorku/2)/1000)*2*pi*buttonPushCounter,3);
            lcd.print("m");
        }
    }

    lastButtonState = buttonState;
    Serial.print("Cas od zapnuti: ");
    Serial.print(millis()/1000,1);
```

```
Serial.println(" s.");
float tep = mojeDHT.readTemperature();
float vlh = mojeDHT.readHumidity();
if (isnan(tep) || isnan(vlh)) {
  Serial.println("Chyba při čtení z DHT senzoru!");
} else {
  Serial.print("Teplota: ");
  Serial.print(tep,1);
  Serial.print(" stupnu Celsia, ");
  Serial.print("vlhkost: ");
  Serial.print(vlh,1);
  Serial.println(" %");
}
}
```

Příloha B Výsledky opakovaného experimentu

KARBID TITANU

		F_{\min} [N]	F_{\max} [N]	Y_p [mm]	Z_{\max} [μm]	Z_p [μm]	V_v [mm³/mm²]
místo	1	1,458	1,478	0,0636	10,105	4,560	0,000238
	2			0,0783	6,863	2,753	0,000132
	3			0,0971	1,805	0,770	3,49E-05
	4			0,0595	7,639	3,489	0,000124
	5			0,1003	13,245	5,708	0,000317
	6			0,0000	0,000	0,000	0
	7			0,1501	2,532	0,947	0,000128
	8			0,0718	2,435	0,870	3,22E-05
x_{\max}	1,478	0,1501	13,245	5,708	0,000317		
x_{\min}	1,458	0,0000	0,000	0,000	0,000000		
R	0,020	0,1501	13,245	5,708	0,000317		
xbar	1,468	0,0776	5,578	2,387	0,000126		
s_x	0,014	0,0426	4,624	2,063	0,000108		

NITRID KŘEMÍKU

		F _p [N]	F _k [N]	Y _p [mm]	Z _{max} [μm]	Z _p [μm]	V _v [mm ³ /mm ²]
místo	1	1,468	1,470	0,26101	22,169	11,123	0,002538
	2			0,23165	18,096	10,777	0,001842
	3			0,19984	19,175	10,646	1,48E-03
	4			0,35237	32,992	16,296	0,005591
	5			0,31811	22,568	11,545	0,003678
	6			0,16558	19,438	13,393	0,002064
	7			0,19657	30,197	15,653	0,002248
	8			0,21615	24,746	15,944	2,34E-03
x _{max}	1,470	0,3524	32,992	16,296	0,005591		
x _{min}	1,468	0,1656	18,096	10,646	0,001475		
R	0,002	0,1868	14,896	5,650	0,004116		
xbar	1,469	0,2427	23,673	13,172	0,002723		
s _x	0,001	0,0641	5,389	2,467	0,001326		

ZIRKONIUM

		F _p [N]	F _k [N]	Y _p [mm]	Z _{max} [μm]	Z _p [μm]	V _v [mm ³ /mm ²]
místo	1	1,452	1,470	0,28793	31,741	16,968	0,0048622
	2			0,37439	26,854	14,186	0,0047692
	3			0,25612	32,034	19,594	0,0053253
	4			0,35318	27,626	15,126	0,0050708
	5			0,38825	24,595	13,689	0,0042975
	6			0,36868	30,036	15,57	0,0055238
	7			0,354	29,992	14,119	0,0056015
	8			0,23573	27,748	12,639	0,0033133
x _{max}	1,470		0,3883	32,034	19,594	0,005602	
x _{min}	1,452		0,2357	24,595	12,639	0,003313	
R	0,018		0,1525	7,439	6,955	0,002288	
xbar	1,461		0,3273	28,828	15,236	0,004845	
s _x	0,013		0,0586	2,564	2,191	0,000753	

LOŽISKOVÁ OCEL

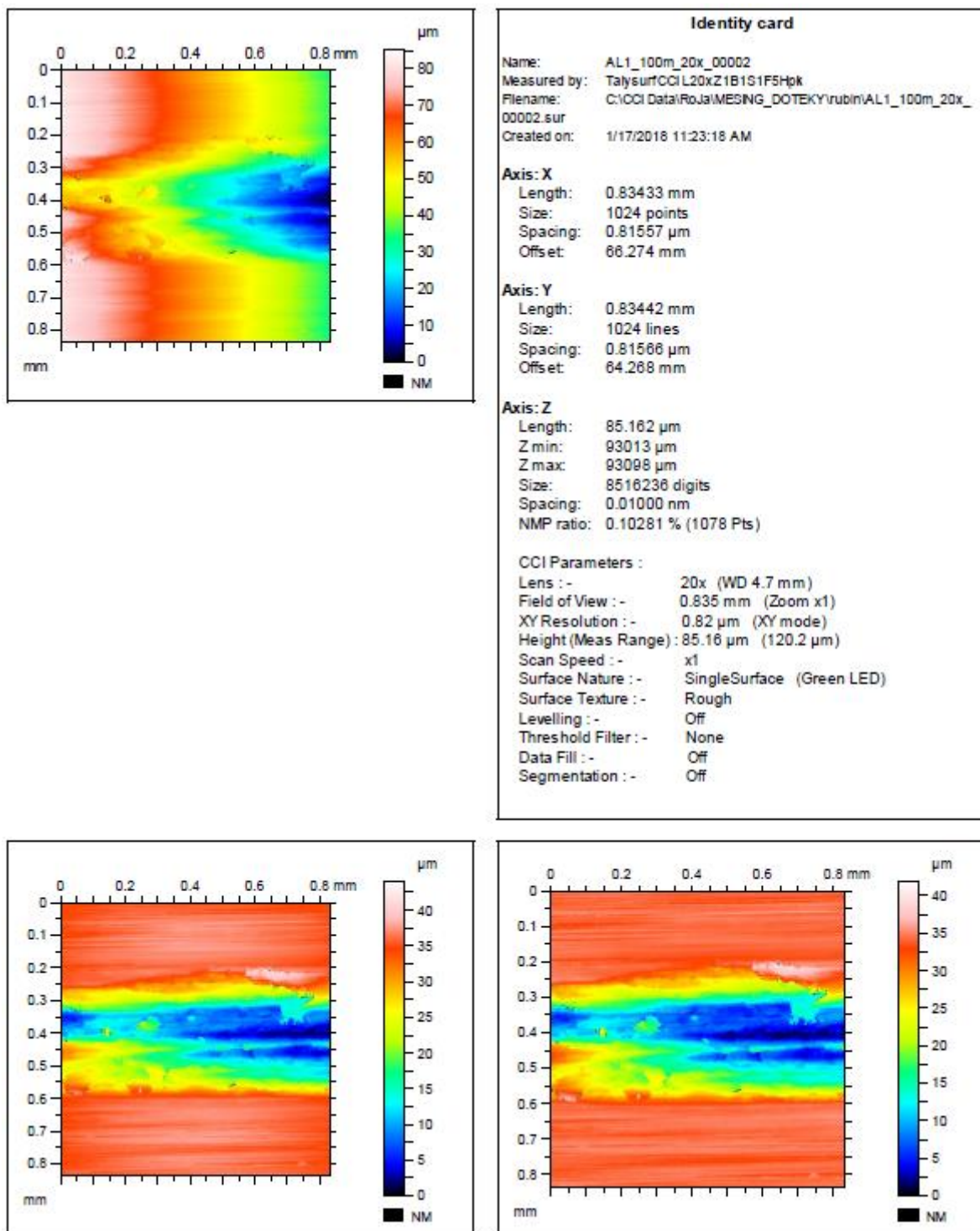
		F _{max} [N]	F _{min} [N]	Y _p [mm]	Z _{max} [μm]	Z _p [μm]	V _v [mm ³ /mm ²]
místo	1	1,484	1,466	0,4062	25,284	16,55	0,0057107
	2			0,45269	21,317	9,9272	0,0020234
	3			0,43148	38,286	21,978	0,0097215
	4			0,49837	34,948	22,23	0,012295
	5			0,5155	38,007	25,109	0,013699
	6			0,51631	43,732	24,837	0,012336
	7			0,43475	36,44	21,926	0,010222
	8			0,50734	40,4	24,716	0,012441
x _{max}	1,484		0,5163	43,73	25,109	0,013699	
x _{min}	1,466		0,4062	21,32	9,927	0,002023	
R	0,018		0,1101	22,42	15,182	0,011676	
xbar	1,475		0,4703	34,80	20,909	0,009806	
s _x	0,013		0,0439	7,64	5,225	0,004004	

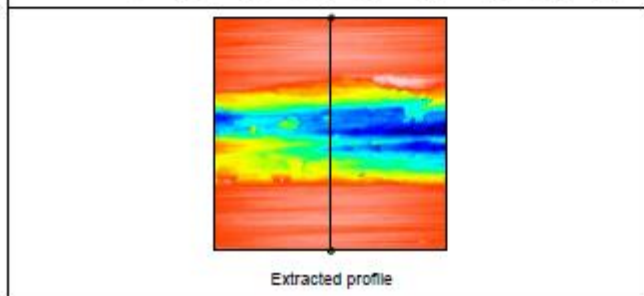
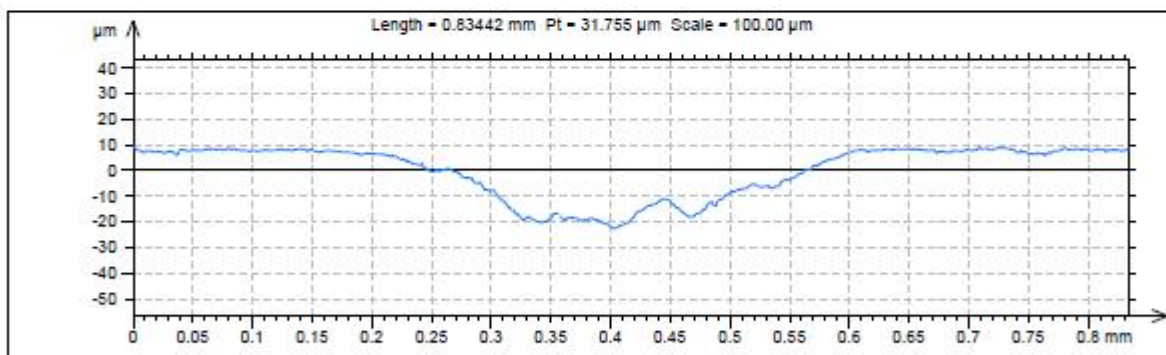
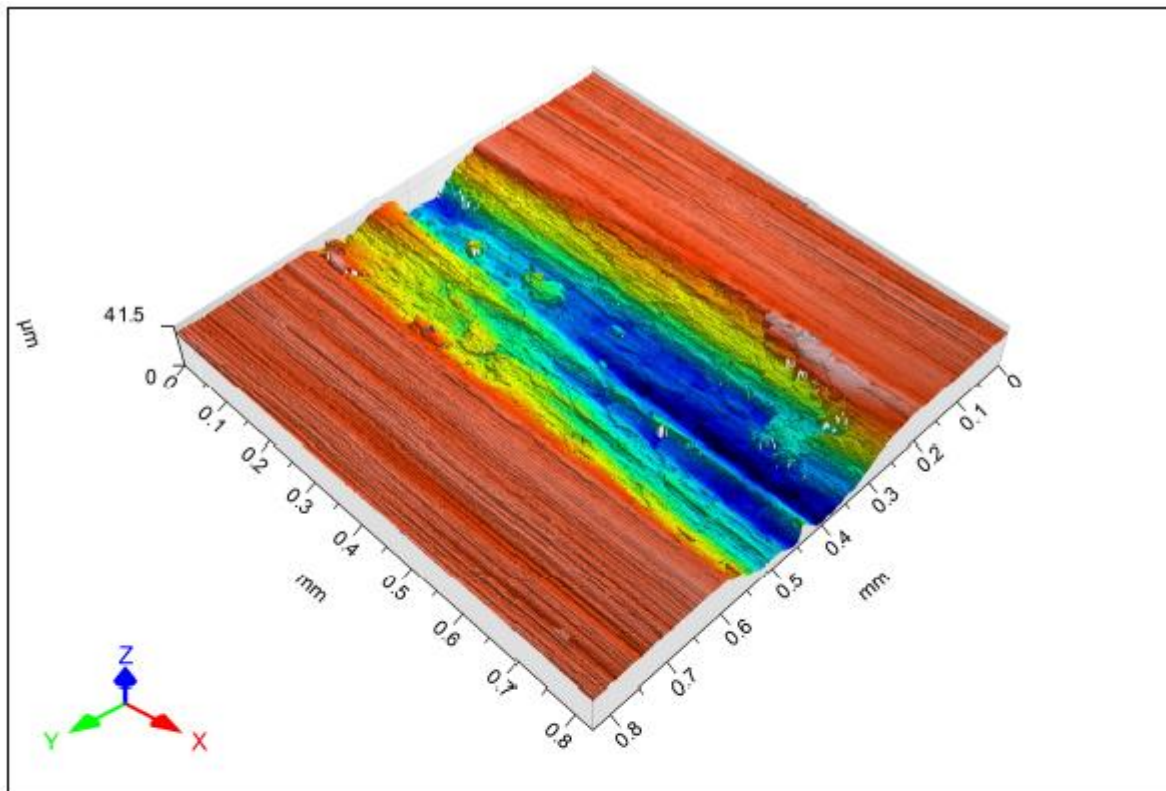
		F_{\max} [N]	F_{\min} [N]	Y_p [mm]	Z_{\max} [μm]	Z_p [μm]	V_v [mm ³ /mm ²]
místo	1	1,483	1,465	0,27977	24,588	14,567	0,002769
	2			0,38907	34,186	21,315	0,006789
	3			0,2602	20,424	12,791	0,002912
	4			0,29364	17,87	8,2244	0,001806
	5			0,31566	20,432	10,301	0,003787
	6			0,39886	36,281	22,371	0,008803
	7			0,27488	28,256	17,402	0,004817
	8			0,23165	31,792	17,553	0,004296
x_{\max}		1,483		0,3989	36,281	22,371	0,008803
x_{\min}		1,465		0,2317	17,870	8,224	0,001806
R		0,018		0,1672	18,411	14,147	0,006997
\bar{x}		1,474		0,3055	26,729	15,566	0,004497
s_x		0,012		0,0598	6,941	5,028	0,002305

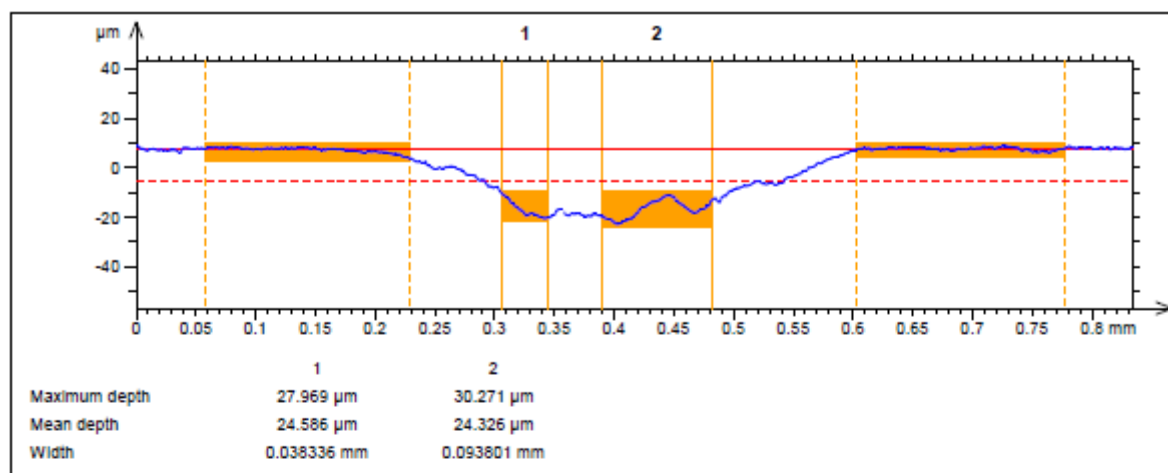
Příloha C Naměřené hodnoty zdvihu a síly pružiny 1,6N s krycí manžetou

zdvih [mm]	síla [N]	zdvih [mm]	síla [N]	zdvih [mm]	síla [N]
-1,5	1,24	-1,496	1,17	-1,497	1,18
-1,404	1,23	-1,398	1,22	-1,403	1,21
-1,3	1,26	-1,303	1,24	-1,306	1,24
-1,199	1,27	-1,202	1,26	-1,205	1,26
-1,096	1,29	-1,101	1,28	-1,098	1,28
-0,999	1,3	-1,004	1,29	-1,004	1,3
-0,899	1,32	-0,9	1,32	-0,899	1,32
-0,805	1,34	-0,801	1,33	-0,801	1,33
-0,701	1,36	-0,703	1,35	-0,701	1,35
-0,604	1,39	-0,605	1,37	-0,602	1,37
-0,499	1,4	-0,499	1,39	-0,501	1,39
-0,401	1,42	-0,406	1,41	0,403	1,41
-0,306	1,44	-0,298	1,43	-0,303	1,42
-0,204	1,46	-0,204	1,45	-0,203	1,45
-0,098	1,46	-0,103	1,44	-0,101	1,44
0	1,48	0	1,45	0	1,46
0,101	1,49	0,103	1,48	0,103	1,5
0,201	1,52	0,204	1,51	0,201	1,51
0,303	1,53	0,306	1,53	0,301	1,53
0,401	1,54	0,405	1,54	0,402	1,55
0,508	1,56	0,503	1,56	0,502	1,56
0,604	1,58	0,607	1,57	0,607	1,57
0,704	1,59	0,707	1,59	0,708	1,59
0,802	1,6	0,81	1,6	0,808	1,6
0,905	1,62	0,902	1,62	0,9155	1,62
1,008	1,64	1,001	1,64	1,007	1,63
1,106	1,65	1,103	1,64	1,108	1,65
1,202	1,67	1,2	1,66	1,208	1,67
1,309	1,68	1,319	1,68	1,304	1,68
1,405	1,7	1,404	1,69	1,407	1,7
1,499	1,72	1,499	1,7	1,5	1,71

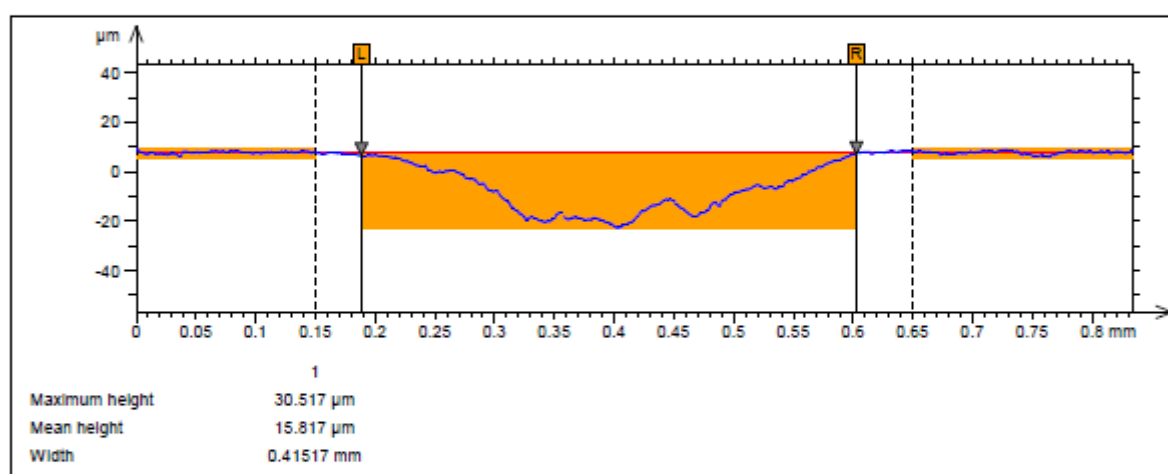
Příloha D Příklad protokolu vyhodnocení naměřené prohlubně ze CCI



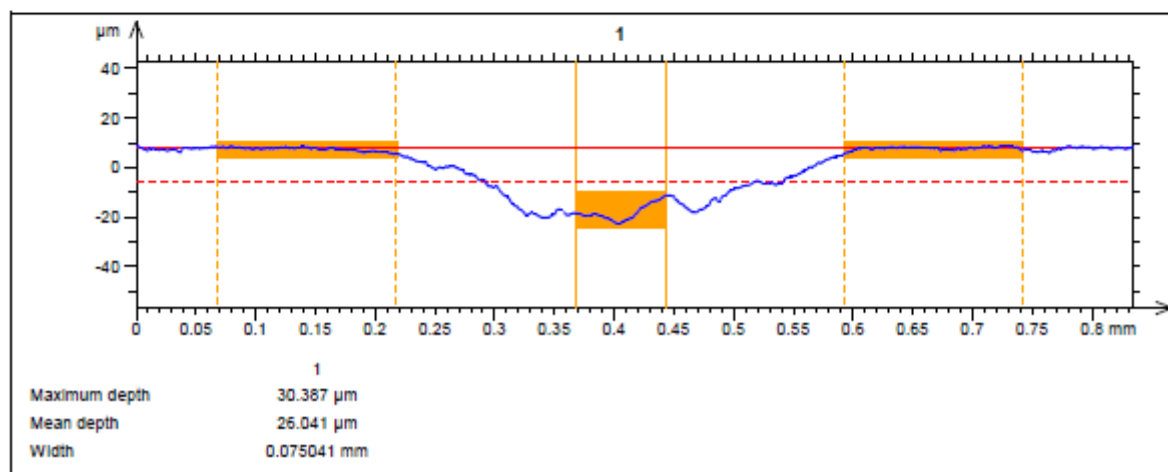




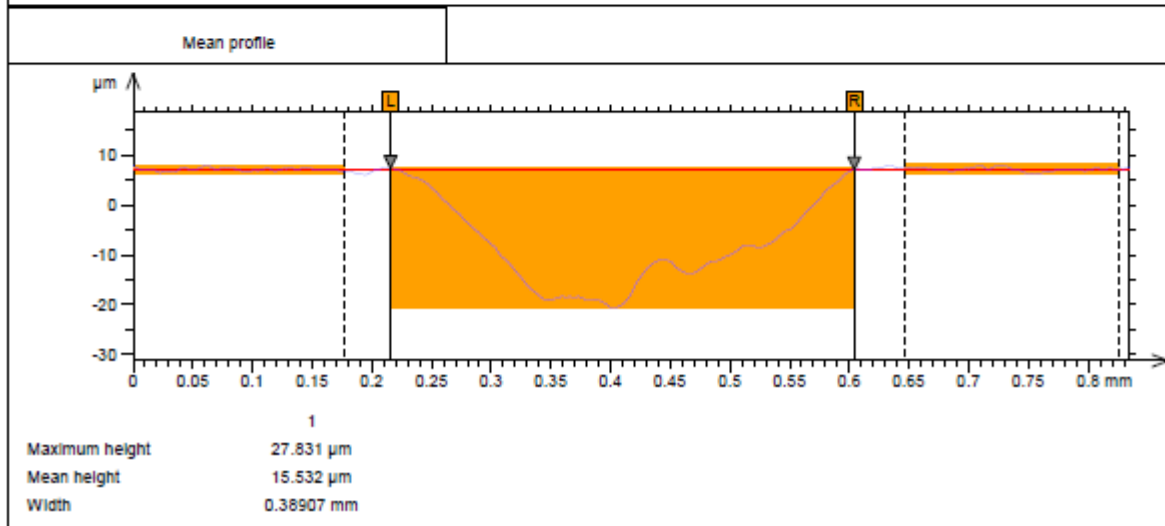
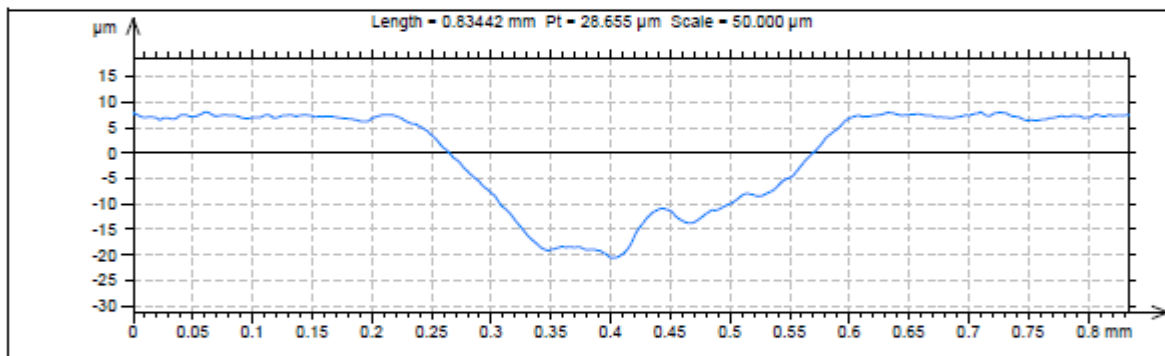
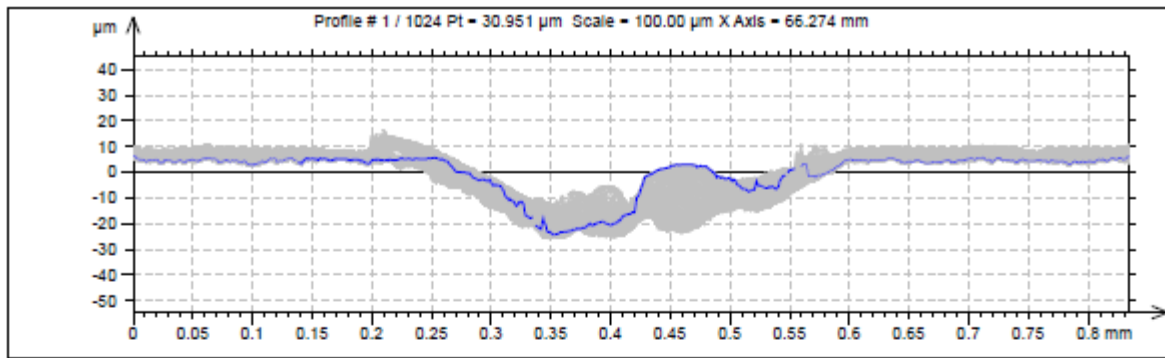
AUTO

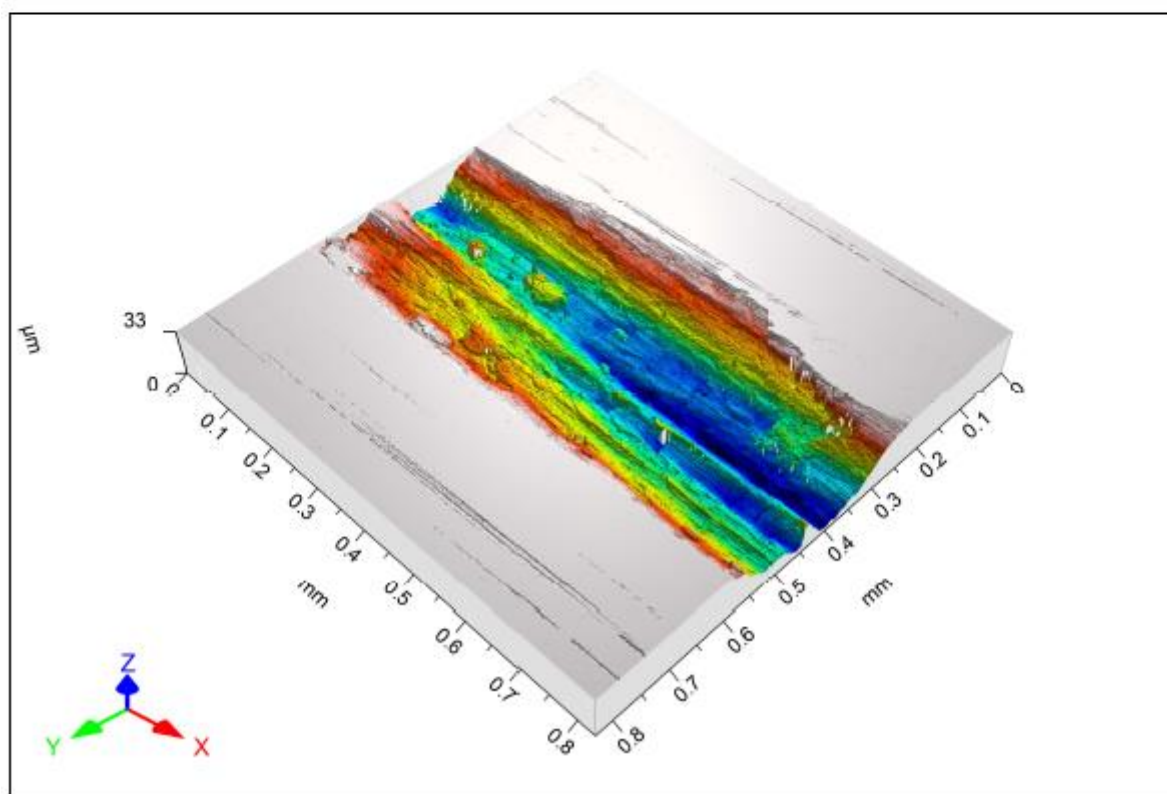
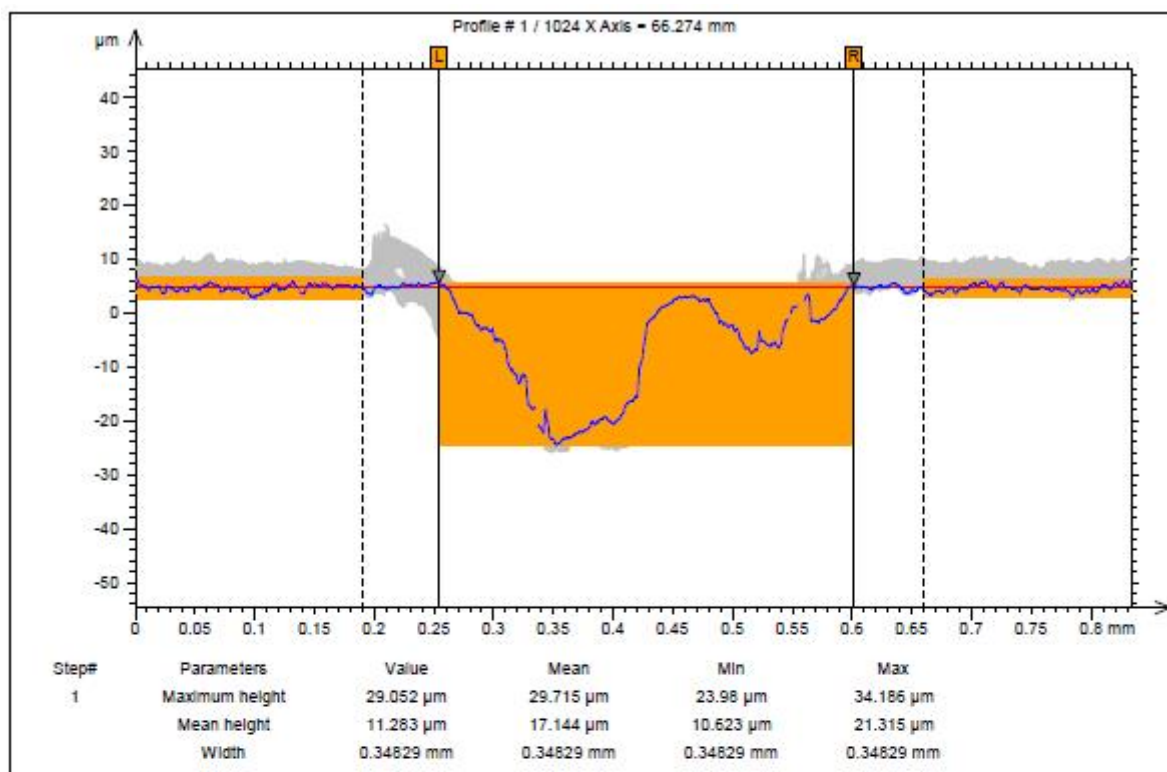


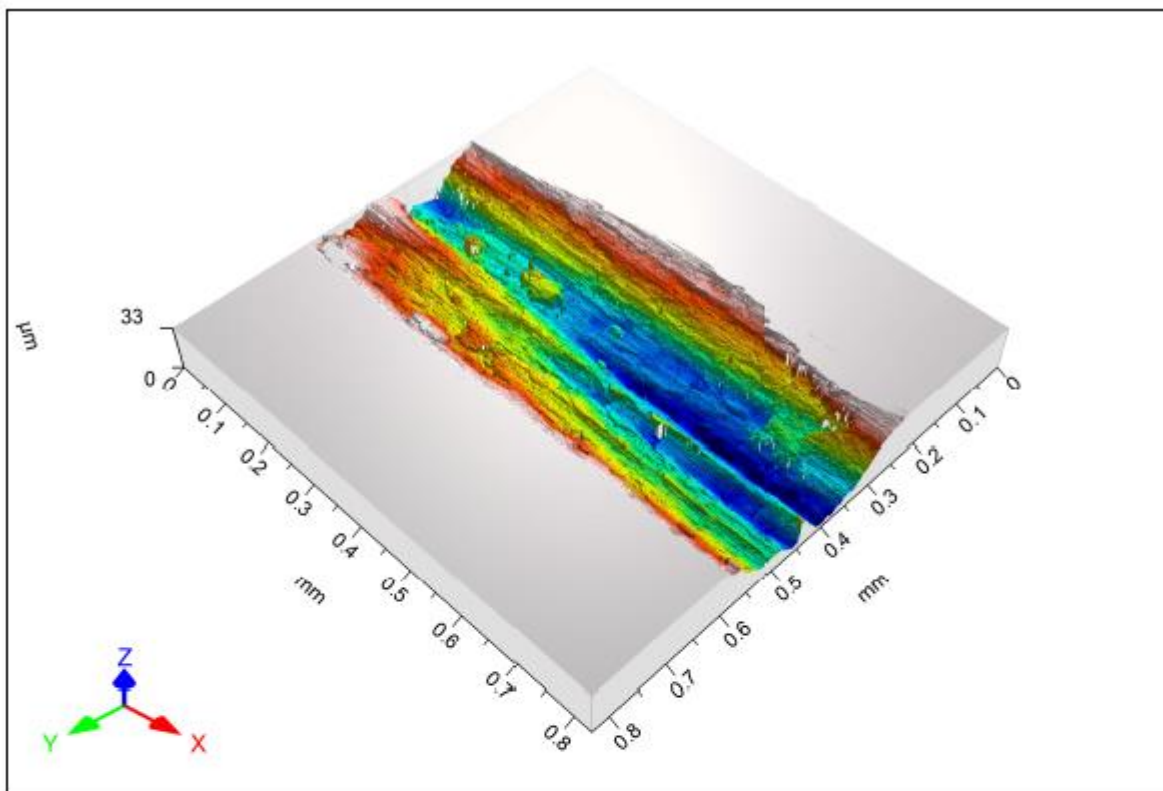
manuální nastavení



ISO







ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	9.6459	µm
Ssk	-1.0836	
Sku	2.6649	
Sp	6.7886	µm
Sv	26.333	µm
Sz	33.121	µm
Sa	8.3052	µm
Functional Parameters (Volume)		
Vm	0.0000	mm ³ /mm ²
Vv	0.0067886	mm ³ /mm ²
Vmp	0.0000	mm ³ /mm ²
Vmc	0.011788	mm ³ /mm ²
Vvc	0.0054992	mm ³ /mm ²
Vvv	0.0067886	mm ³ /mm ²